


“十二五”普通高等教育本科规划教材

21世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材

新能源汽车技术

（第2版）

崔胜民 编著

- 调整知识结构使内容更合理
- 阐述发展新能源汽车的必要性
- 突出新能源汽车技术及发展趋势





“十二五”普通高等教育本科规划教材
21世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材

新能源汽车技术（第2版）

崔胜民　编　著



内 容 简 介

本书全面系统地论述了新能源汽车技术，阐述了新能源汽车的类型，发展新能源汽车的必要性和新能源汽车的技术路线及关键技术；重点讲授了电动汽车用动力电池和电动汽车用电动机的类型、特点、工作原理及基本特性等，以及纯电动汽车、增程式电动汽车、混合动力汽车、燃料电池电动汽车的结构、原理及设计方法等。书中内容既有在新能源汽车上已经广泛应用的成熟技术，也有最新发展的一些高新技术。

本书内容丰富，理论性和实用性强，可作为高等院校车辆工程及其相关专业的教材，也可作为从事新能源汽车相关领域的工程技术人员、管理人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车技术/崔胜民编著．—2版．—北京：北京大学出版社，2014.2
(21世纪全国高等院校汽车类创新型应用人才培养规划教材)
ISBN 978-7-301-23700-7

Ⅰ.①新… Ⅱ.①崔… Ⅲ.①新能源—汽车—高等学校—教材 Ⅳ.①U469.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第003967号

书　　　名：新能源汽车技术(第2版)
著作责任者：崔胜民　编著
策 划 编 辑：童君鑫
责 任 编 辑：黄红珍
标 准 书 号：ISBN 978-7-301-23700-7/TH·0379
出 版 发 行：北京大学出版社
地　　　址：北京市海淀区成府路205号　100871
网　　　址：http://www.pup.cn　　新浪官方微博:@北京大学出版社
电 子 信 箱：pup_6@163.com
电　　　话：邮购部62752015　发行部62750672　编辑部62750667　出版部62754962
印　刷　者：
经　销　者：新华书店
787毫米×1092毫米　16开本　19.5印张　450千字
2009年9月第1版
2014年2月第2版　2014年2月第1次印刷
定　　　价：39.00元

目　　录

第1章　绪　　论

随着世界石油资源的短缺，以及燃油汽车对环境破坏的压力越来越大，发展新能源汽车是实现汽车工业可持续发展的必由之路。

1.1　新能源汽车的定义和分类

1.1.1　新能源汽车的定义

2009年6月17日工信部出台的《新能源汽车生产企业及产品准入管理规则》，再一次对新能源汽车做出了明确的定义：新能源汽车是指采用非常规的车用燃料作为动力来源(或使用常规的车用燃料、采用新型车载动力装置)，综合车辆的动力控制和驱动方面的先进技术，形成的技术原理先进、具有新技术、新结构的汽车。

非常规的车用燃料指除汽油、柴油、天然气（NG)、液化石油气（LPG)、乙醇汽油(EG)、甲醇、二甲醚之外的燃料。

1.1.2　新能源汽车的分类

新能源汽车包括纯电动汽车、增程式电动汽车、混合动力汽车、燃料电池电动汽车、氢发动机汽车、其他新能源汽车等。

1. 纯电动汽车

纯电动汽车(Blade Electric Vehicles，BEV)是一种采用单一蓄电池作为储能动力源的汽车，它利用蓄电池作为储能动力源，通过电池向电动机提供电能，驱动电动机运转，从而推动汽车行驶。

2. 增程式电动汽车

增程式电动汽车是一种配有地面充电和车载供电功能的纯电驱动的电动汽车，其运行模式可以根据需要处于纯电动模式、增程模式或混合动力模式，是介于纯电动汽车和混合动力汽车之间的一种过渡车型，具有纯电动汽车和混合动力汽车的特征，有人把它划分为纯电动汽车范畴，也有人把它划分为混合动力汽车范畴，认为它是一种插电式串联混合动力汽车。

3. 混合动力汽车

混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicle，HEV)是指驱动系统由两个或多个能同时运转的单个驱动系联合组成的车辆，车辆的行驶功率依据实际的车辆行驶状态由单个驱动系单独或多个驱动系共同提供。因各个组成部件、布置方式和控制策略的不同，混合动力汽车有多种形式。

混合动力汽车一般又分为常规混合动力汽车和插电式混合动力汽车，后面不做特殊说明的混合动力汽车主要是指常规混合动力汽车。

4. 燃料电池电动汽车

燃料电池电动汽车(Fuel Cell Electric Vehicle，FCEV)是利用氢气和空气中的氧在催化剂的作用下，在燃料电池中经电化学反应产生的电能作为主要动力源驱动的汽车。燃料电池电动汽车实质上是纯电动汽车的一种，主要区别在于动力电池的工作原理不同。一般来说，燃料电池是通过电化学反应将化学能转化为电能，电化学反应所需的还原剂一般采用氢气，氧化剂则采用氧气，因此最早开发的燃料电池电动汽车多是直接采用氢燃料，氢气的储存可采用液化氢、压缩氢气或金属氢化物储氢等形式。

5. 氢发动机汽车

氢发动机汽车是以氢发动机为动力源的汽车。一般发动机使用的燃料是柴油或汽油，氢发动机使用的燃料是气体氢。氢发动机汽车是一种真正实现零排放的交通工具，排放出的是纯净水，其具有无污染、零排放、储量丰富等优势。

6. 其他新能源汽车

其他新能源汽车包括使用超级电容器、飞轮等高效储能器的汽车。

目前在我国，新能源汽车主要是指纯电动汽车、增程式电动汽车、插电式混合动力汽车和燃料电池电动汽车，常规混合动力汽车被划分为节能汽车。

因此，目前新能源汽车都没有规模化量产，有的有销售但未规模化，如纯电动汽车和插电式混合动力汽车；有的还处于研发阶段，如燃料电池电动汽车。

1.2 发展新能源汽车的必要性

石油短缺、环境污染、气候变暖是全球汽车产业面对的共同挑战，各国政府及产业界纷纷提出各自发展战略，积极应对，以保持其汽车产业的可持续发展，并提高未来的国际竞争力。新能源汽车已成为21世纪汽车工业发展的热点。

1.2.1 石油短缺

据石油巨头英国石油公司(BP)发布的《世界能源统计年鉴2012》显示，截至2011年年底，全球石油储量约1.653万亿桶，比2010年增加8.3%，若按照现在全球每天非常保守的0.8亿桶的耗速来看，当前世界石油储量可供全球消费54年。

从储量上看，世界上排名前10名的国家和地区依次是：沙特阿拉伯，362亿吨；加拿大，184亿吨；伊朗，181亿吨；伊拉克，157亿吨；科威特，138亿吨；阿联酋，126亿吨；委内瑞拉，109亿吨；俄罗斯，82亿吨；中国，60亿吨；利比亚，54亿吨。

我国是一个能源短缺的国家，但却是一个能源消费大国，仅次于美国。2011年我国石油消费量达到4.6亿吨，成为世界第二大石油消费国。目前，我国人均石油消费量为世界平均水平的60%，石油占一次能源消费比重仅为18%，低于世界平均水平(33%)，预计未来我国石油消费仍将持续稳定增长，处于上升通道。

石油在交通领域的消费逐年增长。据预测，到2020年交通用油占全球石油总消耗的62%以上。美国能源部预测，2020年以后，全球石油需求与常规石油供给之间将出现净缺口，2050年的供需缺口几乎相当于2000年世界石油总产量的两倍。

目前世界汽车保有量突破10亿辆，预计到2030年全球汽车保有量将突破20亿辆，主要增量来自发展中国家，其中中国增速全球第一。

我国汽车产量逐年增加。2012年我国汽车产销双双突破1900万辆，再次突破记录，增速都超过了4%，蝉联世界第一，中国成为世界第一大汽车生产国和第一新车销售市场。

我国汽车保有量增加迅速。至2011年8月底，我国汽车保有量突破1亿辆，居世界第二位。预计到2020年，全国汽车保有量将达到2亿辆，由此带来的能源安全问题将更加突出。

汽车消费的快速增长导致石油消耗加速增长。中国机动车燃油消耗量约占全国总油耗的1/3以上，这也使得中国石油对外依存度每年都在不断攀升。据统计，目前汽车用汽柴油消费占全国汽柴油消费的比例已经达到了55%左右，每年新增石油消费量的70%以上被新增汽车所消耗。

我国经济持续快速发展，对石油资源的需求激增，能源供需矛盾日益突出，对进口石油的依赖度不断提高。2011年我国石油对外依存度达到56.5%，比2010年上升了1.7个百分点。2013年我国石油对外依存度将达60%左右。国际能源机构预测，随着越来越多中国消费者购买汽车，到2030年，中国石油消耗量的80%需要依靠进口。

1.2.2　环境污染

燃油汽车在行驶过程中会产生大量的有害气体，不但污染环境，还大大地影响人类健康。汽车尾气排放的主要污染物为一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)、氮氧化物(NO_x)、铅(Pb)、细微颗粒物及硫化物等。这些一次污染物还会通过大气化学反应生成光化学烟雾、酸沉降等二次污染物。据统计，全球大气污染42%源于交通车辆产生的污染。随着城市机动车数量的快速增长，机动车排气污染已成为城市大气污染的主要贡献者。一些城市机动车排放的污染物对多项大气污染指标的贡献率已达到70%以上。机动车排放污染已对城市大气污染构成了严重威胁。

2013年春季，浓浓雾霾遮蔽中国中东部地区。环保部门的数据显示，从华北到中部乃至黄淮、江南地区，都出现了不同程度的污染和严重污染。尤其是北京、天津、石家庄等城市由于低空近地面的空气污染物久积不散，主城地区连续出现空气质量重度污染和严重污染，包括PM2.5、PM10、硫酸或硝酸盐等主要污染物徘徊在较高、超标浓度水平，形成严重的雾霾天气，严重影响了人们的身心健康和日常出行，引起了全社会的广泛关注，机动车是雾霾形成的重要因素之一。因此，必须研究改善城市机动车排放污染的对策和措施。

降低和控制机动车排放污染物的主要措施有：

(1) 不断完善和升级汽车油耗标准。通过制定和实施汽车油耗标准法规，逐步提高汽车油耗水平。近年来，我国汽车行业相关油耗标准不断升级，随着汽车油耗标准法规水平升级，到2015年，当年生产的乘用车平均燃料消耗量降至6.9L/100km，节能型乘用车燃料消耗量降至5.9L/100km以下。到2020年，当年生产的乘用车平均燃料消耗量降至5.0L/100km，节能型乘用车燃料消耗量降至4.5L/100km以下；商用车新车燃料消耗量

将接近国际先进水平。

(2) 不断完善和升级汽车排放标准。通过制定和实施汽车排放标准法规，逐步提高汽车排放技术水平，降低汽车尾气排放。近年来，我国汽车行业排放标准不断升级。轻型汽油车单车碳氢化合物(HC)和氮氧化物(NO_x)国Ⅳ排放限值较国Ⅰ下降81%；重型柴油车单车碳氢化合物国Ⅳ排放限值较国Ⅰ下降58%，氮氧化物下降56%，颗粒物(PM)下降94%。

北京市制定严格的地方标准加强对机动车尾气排放的控制，排放水平要求明显高于全国大部分地区。2013年2月1日率先实施京Ⅴ排放标准，以尽快降低机动车尾气排放。例如，轻型汽油车、重型柴油车单车氮氧化物排放均将下降43%左右，从而降低废气污染物和PM2.5。

(3) 提高燃油品质。燃油品质在很大程度上限制了机动车排放污染物的水平，推迟了汽车排放法规的实施，因此，应尽快提高我国的燃油品质。

(4) 积极开展先进节能减排技术的研发和创新。汽车行业应大力发展混合动力技术，柴油机高压共轨、汽油机缸内直喷、均质燃烧以及涡轮增压等高效内燃机技术和先进电子控制技术，先进传动系统技术(包括六挡及以上机械变速器、双离合器式自动变速器、商用车自动控制机械变速器等)。开展高效控制氮氧化物等污染物排放技术研究等，积极推进有关先进技术的应用。

(5) 大力发展节能与新能源汽车。国家出台了《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》，基本建立了节能与新能源汽车技术研发体系，积极推广示范运行，初步形成节能与新能源汽车产业化能力，并取得积极进展。

(6) 改善城市交通环境。在城市的环境保护中，即使是每一辆机动车都达到了国家规定的排放法规要求，也不能保证城市的交通污染就一定达到环保标准要求。这是由于大量机动车在一定时间、空间内的相对集中，从而造成城市的某一地区在排放污染物总量上超标。因此，从机动车管理的角度来考虑，就是要疏导交通，提高机动车运行速度，优化路网布局，合理分配车流，减少城市中心区的车流密度，改善汽车运行工况，降低机动车污染物排放。

欧洲制订了旨在限制汽车污染物排放的欧Ⅴ和欧Ⅵ标准。根据新标准，未来欧盟国家对本地生产及进口汽车的污染物排放量，特别是氮氧化物和颗粒物排放量的控制将日益严格。

欧Ⅴ标准于2009年9月1日开始实施。根据这一标准，柴油轿车的氮氧化物排放量不应超过180mg/100km，比欧Ⅳ标准规定的排放量减少了28%；颗粒物排放量则比欧Ⅳ标准规定的减少了80%，所有柴油轿车必须配备颗粒物滤网。柴油SUV执行欧Ⅴ标准的时间是2012年9月。

相对于欧Ⅴ标准，将于2014年9月实施的欧Ⅵ标准更加严格。根据欧Ⅵ标准，柴油轿车的氮氧化物排放量不应超过80mg/100km，与欧Ⅴ标准相比，欧Ⅵ标准对人体健康的益处将增加60%～90%。

欧Ⅵ标准将分两个阶段实施。首先，针对全部批准的新车型实施，生效日期是2013年1月1日。之后，从2014年1月1日起，所有从2014年1月1日开始注册的新卡车和客车都必须装备欧Ⅵ认证发动机。欧Ⅵ标准规定的尾气排放中各成分的含量有显著降低，改变包括：所有的NO_x排放降低至0.46g/(kW·h)，同目前的欧Ⅴ限值相比下降了

75%；PM降低到0.01mg/(kW·h)，或是说同欧Ⅴ相比下降66%；推出了更低的排放限值；对所有运行700000km或7年的车辆的欧Ⅵ发动机有一个加强排放耐久性要求；对发动机的车载诊断系统(OBD)性能要求进一步提升；采用新的全世界范围内的“瞬态”和“稳态”测试循环，包括冷起动和正常运行温度时部件状态，测试状态的设计更接近车辆在真实环境中运行时部件的反应。

柴油面包车和7座以下载客车实施欧Ⅴ和欧Ⅵ标准的时间将分别比轿车晚1年。2010年9月，面包车等实施欧Ⅴ标准，面包车的氮氧化物排放量不应超过280mg/100km；2015年9月实施欧Ⅵ标准后，新款面包车的氮氧化物排放量不应超过125mg/100km。

1.2.3　气候变暖

能源的大量消耗带来温室气体排放问题。二氧化碳是全球最重要的温室气体，是造成气候变化的主要原因，而它主要来自化石燃料的燃烧。

据世界上许多科学家预测，未来50～100年人类将完全进入一个变暖的世界。由于人类活动的影响，温室气体和硫化物气溶胶的浓度增加过快，未来100年全球平均地表温度将上升1.4～5.8℃，到2050年我国平均气温将上升2.2℃。

越来越多的证据足以证明，人类活动是造成气候变暖的原因，而气候变暖又是由于大气中聚集了大量温室气体，主要是二氧化碳。交通领域二氧化碳排放成为关注重点。据IEA估计，汽车二氧化碳总排放量将从1990年的29亿吨增加到2020年的60亿吨。汽车对地球环境造成了巨大影响。

控制消费和节约能源是减少二氧化碳排放量的重要途径。仅在工业发达国家，人均能源的消费指数在1～3不等，这就表明，节约能源的余地是极大的。当然，还可以考虑保持适当的消费水平，同时用那些不会产生温室效应的替代品来取代那些会造成污染的能源。

为了减少汽车对全球气候变暖的影响，削减温室气体二氧化碳的排放，汽车应尽量采用小排量发动机和稀薄燃烧发动机，最大限度地提高能源利用效率，从而减少汽车对全球气候变暖的影响。为了减少汽车二氧化碳的排放量，汽车二氧化碳排放法规开始实施。2008年，欧盟要求轿车二氧化碳排放达到140g/km，对于汽油车，对应油耗6L/100km以下；2012年，达到120g/km；2020年，达到100g/km。

如果中国采用一系列先进技术，包括电动汽车、天然气汽车和以天然气为燃料的内燃机技术，到2030年，中国汽车二氧化碳的排放总量有可能降低45%。

在能源和环保的压力下，新能源汽车无疑将成为未来汽车的发展方向。大力推进传统汽车节能减排和新能源汽车产业化，成为中国汽车产业亟须解决的重大课题。

1.3　新能源汽车发展现状

面对全球范围日益严峻的能源形势和环保压力，近年来，世界主要汽车生产国都把发展新能源汽车作为提高产业竞争能力、保持经济社会可持续发展的重大战略举措。新能源汽车成为市场新的增长点。

目前，新一轮的新能源汽车研发、示范和产业化已经开始，而且得到各国政府和企业

的高度重视，但全球新能源汽车产业仍处于初级阶段。

1.3.1 国外新能源汽车发展现状

从国际上看，随着技术的不断创新与突破，面对金融危机、油价攀升和日益严峻的节能减排压力，2008 年以来，以美国、日本、欧盟为代表的国家和地区相继发布实施了新的电动汽车发展战略，进一步明确了产业发展方向，明显加大了研发投入与政策扶持力度。日本以产业竞争力为第一目标，全面发展混合动力、纯电动、燃料电池三种电动汽车，研发和产业化均走在世界前列；美国以能源安全为首要任务，强调插电式电动汽车发展；欧盟以二氧化碳排放法规为主驱动力，重视发展纯电驱动汽车。

从技术层面看，混合动力汽车技术逐步成熟，已进入产品市场竞争期，率先实现了产业化，正成为汽车市场销售新的增长点，其中，日本市场混合动力汽车已达到汽车销量的10%左右；纯电动汽车电池技术进步加速，整车产品更加接近消费者需求，插电式电动汽车作为一种具有纯电动和混合动力双重特征的电动汽车技术成为全球新的研发热点，以电池租赁为代表的纯电动汽车商业模式创新取得进展，世界主要汽车制造商加快了纯电动汽车量产步伐；车用燃料电池技术取得重大进展，通用汽车公司轿车燃料电池发动机贵金属催化剂 Pt 的用量从上一代的 80g 降低到 30g，并计划 2015 年降至 10g，燃料电池轿车在动力性、安全性、续航里程、低温起动等性能指标方面已接近汽油车水平，燃料电池汽车整车成本显著下降，丰田公司宣布，2015 年将实现燃料电池车零售价为 5 万美元/辆的目标。

经多年探索实践，国际汽车产业界达成了电动汽车产业化战略共识：在技术路线上，近期(2010—2015 年)，在依靠内燃机汽车技术改进和推进车辆小型化实现降低油耗和排放的同时，为满足更为严格的节能减排法规目标要求，应尽快推进混合动力技术的应用，并发展小型纯电动汽车和插电式混合动力汽车；中期(2015—2020 年)，在混合动力技术得到广泛应用的基础上，提高汽车动力系统电气化程度，加大小型纯电动汽车和插电式混合动力汽车推广力度；中远期(2020 年以后)，各种纯电驱动技术将逐步占据主导地位，通过进一步发展纯电动汽车和燃料电池汽车，实现大幅度降低石油消耗和二氧化碳排放。在车型应用方面，纯电动、混合动力和燃料电池等不同类型的电动汽车技术各自具有最优的交通出行适用范围。对于城市短途出行需求，小型纯电动汽车具有优势；对长途出行需求，适合采用混合动力汽车、插电式混合动力汽车或者燃料电池汽车。

下面重点介绍美国、日本、法国和德国有关新能源汽车的发展情况。

1. 美国

2013 年 1 月 10 日，在海南博鳌开幕的全球新能源汽车大会公布了《2012 年全球新能源汽车产业发展研究报告》。报告显示，2012 年前三个季度，美国新能源汽车售出 31081 辆，同比增长 19978 辆，增长率为 179.93%，新能源汽车销售总量居世界之首。

2012 年，纯电动汽车在美国销售 14687 辆，为全年汽车销售量的 0.1%，2015 年前部署 100 万辆电动汽车的目标无法实现。

世界上第一辆电动汽车早在 1834 年就在美国诞生。美国在新能源汽车技术研发和政策支持上一直走在世界前列。

新能源汽车的开发和应用成为美国摆脱能源依赖的战略之一。20 世纪 90 年代中期，

美国克林顿政府制订发展电动车的“新一代汽车伙伴（PNGV）计划”，集中研究电池驱动的纯电动汽车。但由于纯电动汽车一次充电后的续驶里程短，充电时间长，降低电池造价困难，在技术上也难以解决废旧电池二次污染、回收困难的问题，商业化进展缓慢。

2002年，布什政府不再积极鼓励发展纯电动汽车，重新提出自由汽车（自由燃料）Freedom CAR计划，实际上是放弃了纯电动汽车研究而更多转向燃料电池汽车技术的研发。这一时期，美国在氢燃料电池汽车领域取得了一定的进展，其技术研发确实在世界处于先进水平。但是燃料电池汽车仍然有一系列技术瓶颈有待突破，成本与基础设施建设等问题尚未解决，产业化进程缓慢。

2005年，美国政府出台了《能源政策法》，按纯电动汽车总重划分为四档：小于且等于8000磅；大于8000磅且小于等于14000磅；大于14000磅且小于等于26000磅；大于26000磅。根据重量的不同确定不同的减税幅度，购买总重不超过8500磅的纯电动汽车减3500美元，若这种纯电动汽车一次充电续驶里程达到100英里的或有效荷载容量达到1000磅的，可以增大减税幅度到6000美元，支持纯电动汽车的发展。同时，美国政府也鼓励以混合动力汽车为代表的其他新能源汽车的使用。美国的混合动力汽车在2004年前后进入商业化推广阶段，2007年5月初，美国国内收入局（IRS）调整针对环保车辆的税收优惠措施，规定消费者购买通用汽车、福特、丰田、日产等公司生产的符合条件的混合动力汽车，可以享受到250～2600美元不等的税款抵免优惠。2009年混合动力汽车销售29万辆，占美国汽车总销量的2.8%左右。

2007年11月，美国能源部再斥资2000万美元增强对插电式混合动力汽车的研发，其中与美国先进电池联盟（USABC）对5个PHEV电池研发项目合作投资1720万美元，并为密歇根大学提供近200万美元PHEV研究经费；加上USABC的匹配资金，项目总投入达到3800万美元。2008年混合动力汽车销售32万辆，占美国汽车总销量比例达到2.3%左右。虽然美国是混合动力汽车全球销量最大的国家，但混合动力汽车在美国的汽车销量占有比例相当低，2008年约占整体汽车销量的2.4%。

美国能源部2008年6月12日宣布将拨款3000万美元，资助通用汽车公司、福特汽车公司、通用电气公司的研究项目。美国能源部的目标是到2014年制造出有成本竞争力的、充电一次就可行驶40英里的混合动力汽车，并到2016年实现批量生产。2008年12月，14家美国电池和先进材料企业，在美国阿贡国家实验室（Argonne National Laboratory）的支持下，成立了先进交通运输用电池生产国家联盟，以提高美国车用锂离子电池制造实力。

推动新能源汽车发展是奥巴马政府能源政策的组成部分。美国总统奥巴马希望通过发展和利用新能源，使美国摆脱对海外石油的过度依赖。奥巴马上任后，通过进一步制定严格的汽车燃油排放标准和新能源汽车政策，以及通过政府采购节能汽车，消费者购买节能汽车减税，设立新能源汽车的政府资助项目，投资促进新能源汽车基础设施建设等策略，进一步推动汽车产品朝着“小型化”和“低能耗”的方向发展。

在奥巴马签署生效的经济刺激计划中，把充电式混合动力汽车作为刺激经济和拯救汽车业的一张王牌。在他的倡导下，联邦政府为推进充电式混合动力汽车计划，在短短几个月内紧锣密鼓地出台了一系列强力措施，斥资140亿美元支持动力电池、关键零部件的研发和生产，支持充电基础设施建设，消费者购车补贴和政府采购。美国还设立了一个总量为250亿美元的基金，以低息贷款方式支持厂商对节能和新能源汽车的研发和生产，目标

是每年汽车燃油经济性提高一倍。日产和福特公司分别获得 59 亿美元和 16 亿美元的贷款，成为该基金的第一批受益者。

驱动混合动力汽车行驶的电池组技术是需要突破的关键。奥巴马在考察位于加利福尼亚州一家电动汽车测试中心时宣布，美国能源部将设立 20 亿美元的政府资助项目，用以扶持新一代电动汽车所需的电池组及其部件的研发。为此，道氏化学、韩国 LG 等四家电池制造商宣布了在密歇根州的投资计划，总额达 17 亿美元，他们也相应得到了总额 5.4 亿美元的税收优惠。这一揽子计划形成了美国新能源汽车产业化和市场化的第一推动力。

所有新能源政策，更加明确了研发汽车新产品的方向和目标。预计到 2015 年，美国联邦政府购车中一半是充电式混合动力汽车或纯电动汽车，美国本土将有 100 万辆混合动力汽车投入使用。

2010 年 4 月 1 日在纽约举行的国际汽车展上，新一代的新能源汽车如电动汽车、油电混合动力汽车和体积小的节能车毫无悬念地占据了中心舞台。

在同一天，美国奥巴马政府公布新规定，首次为新轿车和轻型卡车订立温室效应气体排放标准，从目前的每加仑汽油平均行驶 25 英里，提高到 2016 年前行驶 35.5 英里，鼓励发展新一代省油的油电混合动力汽车、效率更高的发动机和电动汽车，从而终结了美国联邦管理官员与汽车制造商长达 30 年的激烈争执，这个目标比现行美国法律所作规定提早了4 年。

美国总统奥巴马提出在 2015 年以前推广 100 万辆这种环保汽车。为鼓励美国消费者购买，他还宣布将给予购买插电式电动汽车的人每辆车 7500 美元抵税额。

在国外，成立联盟已成为国外发展新能源产业的重要途径之一，2009 年，美国电动汽车产业链上的各方发起成立了美国电动汽车联盟(Electrification Coalition，EC)，成员涵盖雷诺汽车、江森自控、太平洋燃气和电力公司、A123 电池系统公司、联邦快递公司等企业国。美国电动汽车联盟主要致力于从政策和行动上推动大规模实施电动汽车计划，最终改变美国经济、环境和对化石能源严重依赖的现状，实现美国电动汽车运输的革命性变化。

美国电动汽车联盟提出的电动汽车发展目标和行动计划，主要内容有：①到 2040 年美国将拥有 2.5 亿辆电动汽车，其中 3/4 的轻型车需求由电动汽车提供，届时美国轻型车耗油量将减少 75%，美国基本上摆脱进口石油依赖；②争取到 2020 年，全美拥有电动汽车 1400 万辆，近 1/4 的轻型汽车需求由纯电动汽车或插入式电动汽车提供；③呼吁联邦政府拨款 1300 亿美元，资助电动汽车电池开发生产和传统汽车厂商的转型；呼吁出台有吸引力的、鼓励民众使用电动汽车和建设电动汽车基础设施的税收激励或财务补助政策措施，先行在美国 33 个重点城市展开，以期到 2013 年，全美有 75 万辆电动汽车上路，到 2018 年全美初步形成良好的电动汽车生态系统。

2. 日本

2012 年，日本前三季度新能源汽车销量为 17513 辆，同比增长 8896 辆，增长率为 103.24%，新能源汽车销量位居世界第二。

日本新能源汽车的产业化成果在全球范围内是最好的。在新能源汽车方面，日本主要走混合动力汽车的技术路线。日本在混合动力汽车技术领域，领先世界。以丰田普锐斯为代表的日本混合动力汽车，在世界低污染汽车开发销售领域已经占据了领头地位。

目前，在欧美市场上已上市的混合动力汽车，一半以上是由日本汽车公司生产销售的，日本丰田普锐斯混合动力汽车自1997年12月上市以来，在全球的销量已经超过了300万辆，预计到2015年累计销量将达到500万辆，成为目前最成功的混合动力车型。与此同时，日本还快速发展燃料电池汽车技术，丰田和本田汽车公司已成为当今世界燃料电池汽车市场上的重要企业。

丰田的第四代充电式油电混合动力汽车普锐斯将于2014年左右面市。丰田还将未来的汽车动力划分为三大类：第一类是用于近距离移动的小型家庭车辆，为纯电动汽车；第二类是一般家庭用乘用车，为混合动力和插入式混合动力汽车，包括用汽油、轻型燃油、生物燃料、天然气以及合成燃料等；第三类是用于长途运输的商用车，为燃料电池汽车。在这些动力中，丰田汽车所认为的终极燃料将是利用电力和水取得的。

除丰田外，其他几家日本汽车企业也在开发新一代的新能源动力汽车，如本田的Insight IMG混合动力汽车、日产Leaf和三菱i-MiEV的纯电动汽车等。

日本政府在2009年6月启动了“新一代汽车”计划，所谓“新一代汽车”，实际指的就是环保汽车，包括混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车等。该计划力争在2050年使环保汽车占据汽车市场总量的一半左右，为了实现这一计划，日本政府通过援建电动汽车基础设施、减税和发放补贴等促进环保汽车发展。

2010年4月12日，日本经济产业省提出了截至2020年使混合动力汽车和纯电动汽车等“新一代汽车”占新车销量达到20%～50%的报告《新一代汽车战略2010》，报告中还提出了截至2020年将建设普通充电站200万座、快速充电站5000座的目标。

为推广新能源汽车以及环保汽车，日本从2009年4月1日起实施“绿色税制”，它的适用对象包括纯电动汽车、混合动力汽车、清洁柴油汽车、天然气汽车以及获得认定的低排放且燃油消耗量低的车辆。前3类车被日本政府定义为“下一代汽车”，购买这类车可享受免除多种税赋优惠。日本实行的“绿色税制”可使混合动力汽车税减免2万日元，和车辆购置税减免4万日元。同时，另外一项“补助金”政策可支付混合动力汽车与汽油原型车差价的一半。因此一辆价格在200万日元的混合动力汽车总共可以减免购车费用约26万日元，约占13%。更重要的是近年来，由于实现了规模化生产，混合动力汽车的价格有了很大的下降空间，实际购买时基本上消除了两者之间的差价。反过来又进一步促进了混合动力汽车的销售规模，从而进入了良性循环。同时，节油更使消费者尝到了使用混合动力汽车的甜头。总之，政府的政策启动起到了关键作用，企业拿得出质量可靠的产品起到了保证作用。

此外，日本实施低排放车认定制度。高、中档轿车和经济型轿车都可以向国土交通省申请接受低排放车认定。消费者可根据所购车辆的排放水平享受不同的减税待遇，购置以天然气为燃料或混合动力汽车等低公害车辆的地方公共团体还可得到政府的补助金。

在日本政府的积极扶持下，日本主要汽车生产厂家也无一例外地提出了自己的新能源汽车战略。丰田公司宣布在未来几年里，将混合动力汽车车型增加到10种；日产公司也将批量生产纯电动汽车，投放日本和欧洲市场；三菱汽车、富士重工也在积极推进纯电动汽车的商业化。

3. 法国

2012年，法国前三季度新能源汽车共销售4451辆，同比增长3023辆，增长率高达

211.69%，是增长率最高的国家。

法国是石油缺少的国家，汽油昂贵，油价约为美国的四倍，每年从国外进口大量的石油。20世纪70年代的石油危机成为法国开发电动汽车的转折点，1973年雷诺汽车集团已研制出电动汽车。标致-雪铁龙与雷诺两大汽车公司一直在积极研制电动汽车，1990年标致-雪铁龙公司的J-5和C-25电动货车投入生产，该公司1995年正式将标致106和雪铁龙AX电动轿车投入生产。从1995年7月1日开始，政府给购买电动汽车的用户提供5000法郎补贴，法国电力公司从自身利益考虑，向电动汽车制造厂生产的电动汽车每辆提供一万法郎的补助。这些措施给电动汽车在法国发展创造了良好的环境。

20世纪90年代中期，法国开始推广电动汽车和天然气汽车。1999年，政府要求所有市政部门的电动汽车及天然气汽车比例必须占市政部门拥有车辆总数的20%以上，以此带动整个社会选择环保车型。

近两年来，作为环保车型中的“佼佼者”，纯电动汽车和混合动力汽车在法国市场上具有独特的优势，这与政府推出的政策密不可分。

法国政府规定，自2008年1月1日起，政府按所购买新车的尾气二氧化碳排放量多少，对车主给予相应的现金“奖罚”，以鼓励购买低排量环保车型。按规定，凡购买尾气二氧化碳排放量介于100～130g的新车，车主可获得现金200～1000欧元不等的环保奖励。若购买超低能耗、低排放的新能源汽车如电动汽车，奖励金额则高达5000欧元。反之，如果尾气二氧化碳排放量在160g以上，将按递增方式向车主征收环保税，税额从200～2600欧元不等。此外，法国政府还鼓励报废能耗大的旧车，并给予一定数额的现金奖励。

在这些补贴、征税等政策的指导下，众多汽车商和消费者都将目光投向了更为环保的小排量汽车和新能源汽车。2009年，二氧化碳排量在140g/km以下的汽车占了法国新车销售市场63%的份额。

在政府优惠政策的带动下，汽车生产商们也都闻风而动，雷诺-日产联盟、标致-雪铁龙与日本三菱汽车公司合作，相继推出了环保电动汽车。

4. 德国

2012年，德国前三季度新能源汽车销量为1844辆，增长率为3.25%，新能源汽车产业增速较慢。

德国在新能源汽车方面也做出了重要贡献。宝马也是氢动力发动机车型研究的先行者，早在2004年宝马所研发的H2R赛车就在法国南方小镇Miramas高速赛道创造了9项世界纪录。其搭载一台6.0L V12氢动力发动机，最高车速达到了300km/h以上，破百时间被严格地控制在了6s以内。有了H2R赛车成功的先例，宝马就坚定了继续研发氢动力发动机车型的信心。在2007年，其向外界推出了7系氢动力车型，该车型搭载一台6.0L V12氢动力发动机，最大功率为260hp(1hp=745.700W)，最大转矩为390N·m。这个数据同汽油发动机车型的445hp相比还是存在一定的差距，但是260hp的动力也已经非常具有优势，毕竟零排放才是其真正的杀手锏。这台发动机是基于宝马760i的6.0L V12发动机改进而来，按照双模式驱动的要求，在汽油模式下燃油通过直接喷射供应，同时在发动机进气系统中集成了氢供应管路。这台发动机的关键技术是喷射阀体需要提供相应的燃料/空气混合气体，在很短的时间内将适量的氢气送入进气当中。在解决这一难题的过程

中，宝马发动机所具有的 Valvetronic 电子气门和 Double－VANOS 双凸轮轴可变气门正时系统起到至关重要的作用。虽然具有最为先进的技术，但是高昂的研发费用使得这款车的价格不菲，宝马目前只生产了 100 辆氢动力 7 系车型通过特殊的营销渠道供应给消费者。

德国政府表示，到 2020 年，可再生能源要占全部能源消耗的 47%，因此，2020 年德国境内的新能源汽车要超过 100 万辆。在 2009 年年初德国政府通过的 500 亿欧元的经济刺激计划中，很大一部分用于电动汽车研发、“汽车充电站”网络建设和可再生能源开发。

进入 21 世纪，国外各大汽车公司纷纷制订新的新能源汽车开发计划。在这个“环保竞技场”上，包括通用、奔驰、大众、宝马、丰田、本田、福特、克莱斯勒、日产等先行者，更是当仁不让地扮演了开发新能源汽车的主角。

1.3.2　国内新能源汽车发展现状

我国高度重视电动汽车技术的发展。“十五”期间，启动了“863”计划电动汽车重大科技专项，确立了“三纵三横”(三纵：混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车；三横：电池、电动机、电控)的研发布局，取得了一大批电动汽车技术创新成果。“十一五”以来，中国提出“节能和新能源汽车”战略，政府高度关注新能源汽车的研发和产业化。

2006 年 6 月，“十一五”的“863”计划节能与新能源汽车重大项目通过论证。其重点任务是推进燃料电池汽车研发和示范运行，实现混合动力汽车规模产业化，拓展纯电动汽车的应用范围，进一步扩大代用燃料汽车的推广应用；促进节能与新能源汽车产业政策、法规和相关标准的研究与制订，完善相关检测评价能力，形成知识产权保护和投融资服务体系，构建节能与新能源汽车公共服务平台，建立中国节能与新能源汽车产业联盟；把握交通能源动力系统转型的重大机遇，建立以企业为主体的产学研结合的自主研发创新体系。

2006—2007 年，中国新能源汽车产业取得了重大的发展，中国自主研制的纯电动、混合动力和燃料电池三类新能源汽车整车产品相继问世；混合动力和纯电动客车实现了规模示范；纯电动汽车实现批量出口；燃料电池轿车研发进入世界先进行列。

2008 年 7 月 11 日，科技部和北京市举行了奥运新能源汽车示范运行交车仪式。交车仪式上，各类车型共计 595 辆交付使用，为官员、运动员、教练员、媒体记者以及社会观众等提供服务。这 595 辆新能源汽车包括：上海动力、同济大学与上海大众等单位联合研制的 20 辆燃料电池汽车；奇瑞汽车有限公司研制生产的 40 辆 BSG、10 辆 ISG 混合动力汽车；长安汽车有限公司研制生产的 25 辆杰勋牌混合动力汽车；京华客车有限公司、北京理工大学等单位联合研制生产的 50 辆纯电动公交车；中通客车控股公司研制生产的 5 辆纯电动客车；一汽集团研制的 10 辆解放牌混合动力客车和 5 辆奔腾牌混合动力汽车；东风汽车公司研制生产的 15 辆东风混合动力客车和 410 辆纯电动场地车；北汽福田汽车股份有限公司联合清华大学研制了 3 辆低地板燃料电池客车等。据统计，北京奥运会、残奥会期间，这 595 辆汽车累计运行 371.4 万 km，载客 441.7 万人次，执行公务用车 970 次。我国自主研发的新能源车辆通过了这次规模化、集中化、高强度的运行考核，用科技成果和实际行动实现了奥林匹克中心区域交通“零排放”，在中心区域的周边地区和奥林匹克交通优先路线上的“低排放”。

2010 年上海世博会期间，也有超过 1000 辆新能源汽车在世博场馆和周边运行。其中

世博会园区以新能源汽车实现公共交通的零排放，包括120辆纯电动客车、36辆超级电容客车和6辆燃料电池汽车通过公交车形式示范运行，140辆纯电动场馆车和100辆燃料电池观光车通过特定形式满足公共需求，可减少二氧化碳排放1.3万吨；园区周边则以符合国Ⅳ标准的混合动力汽车实现低排放。

为推动节能与新能源汽车规模化、产业化，促进我国汽车产业加快结构调整、实现跨越式发展，奥运会后，财政部、科技部发出了《关于开展节能与新能源汽车示范推广工作试点工作的通知》(以下简称《通知》)，决定在北京、上海、重庆、长春、大连、杭州、济南、武汉、深圳、合肥、长沙、昆明、南昌共13个城市开展节能与新能源汽车示范推广试点工作。鼓励试点城市率先在公交、出租、公务、环卫和邮政等公共服务领域推广使用节能与新能源汽车。《通知》明确中央财政重点对试点城市购置混合动力汽车、纯电动汽车和燃料电池等节能与新能源汽车给予一次性定额补助。补助标准主要依据节能与新能源汽车与同类传统汽车的基础差价，并适当考虑规模效应、技术进步等因素确定。《通知》同时要求地方财政安排一定资金，对节能与新能源汽车配套设施建设及维护保养等相关支出给予适当补助，保证试点工作顺利进行。目前，节能与新能源汽车示范推广试点城市已增至25个，增加了天津、海口、郑州、厦门、苏州、唐山、广州、沈阳、成都、南通、襄樊、呼和浩特共12个城市。

2009年1月14日国务院常务会议原则通过汽车产业调整振兴规划，决定实施新能源汽车发展战略，重点强调将以新能源汽车为突破口，加强自主创新，形成新的竞争优势。这一决定将推动中国新能源汽车尽快实现产业化，也将为中国在新能源汽车领域走在世界前列、形成竞争优势奠定基础。

2010年8月18日，国务院国资委在北京召开由16家中央企业发起的“中央企业电动汽车产业联盟”成立大会，旨在有效发挥中央企业在我国经济结构调整、产业转型中的带头和引领作用，形成合力加快推动我国电动汽车产业的发展，以联盟的方式，促进企业间的合作与协同发展，快速、有效地突破电动汽车产业核心技术，尽快形成规模化发展态势。

2010年9月8日，国务院常务会议审议并原则通过《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》。其中，节能环保、新一代信息技术、生物、高端装备制造、新能源、新材料和新能源汽车等7个产业，被确定为我国的战略性新兴产业并将在今后加快推进。

2012年5月30日，国务院常务会议通过了《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》，规划中明确提出新能源汽车产业要加快高性能动力电池、电动机等关键零部件和材料核心技术研发及推广应用，形成产业化体系。从2012年起国家每年将安排10～20亿元资金，支持具备量产条件的新能源汽车产业化，支持节能汽车技术研发和产业链建设。继续加大25个城市公共服务领域新能源汽车示范推广力度，特别要扩大公务、物流、租赁等行业的使用规模。同时要求试点城市尽快取消新能源汽车的车牌拍卖、摇号、限行等限制措施，出台停车费、电价、道路通行费等扶持政策，加快充电站等基础设施建设步伐。

2012年7月9日，由工信部牵头制订的《节能与新能源汽车发展规划(2011—2020年)》正式发布。规划提出，到2015年，纯电动汽车和插电式混合动力汽车累计产销量力争达到50万辆；到2020年，纯电动汽车和插电式混合动力汽车生产能力达200万辆、累计产销量超过500万辆，燃料电池汽车、车用氢能源产业与国际同步发展。规划提出的主

要目标还包括：新能源汽车、动力电池及关键零部件技术整体上达到国际先进水平，掌握混合动力、先进内燃机、高效变速器、汽车电子和轻量化材料等汽车节能关键核心技术，形成一批具有较强竞争力的节能与新能源汽车企业。

规划明确了业内关注的新能源汽车技术路线：以纯电驱动为新能源汽车发展和汽车工业转型的主要战略取向，当前重点推进纯电动汽车和插电式混合动力汽车产业化，推广普及非插电式混合动力汽车、节能内燃机汽车，提升我国汽车产业整体技术水平。

2012年，我国新能源汽车的发展仍处于起步阶段。截至2012年8月底，全国25个示范运行的城市共有新能源汽车27400辆。其中不少示范运行的城市不足千辆。据中汽协会不完全统计，2012年全年国内新能源汽车共销售12791辆(未计常规混合动力汽车)，其中纯电动汽车11375辆，插电式混合动力汽车1416辆。如按乘用车计(包括混合动力车)，共销售纯电动汽车8198辆，混合动力汽车6181辆。目前，进入国家产品公告的新能源汽车有350余款。

2013年11月26日，财政部、科技部、工业和信息化部、发展改革委四部委共同确定并公布了我国新一轮第一批新能源汽车推广应用城市或区域的名单，包括23个城市和5个城市群，共28个。23个城市分别是北京市、天津市、太原市、晋城市、大连市、上海市、宁波市、合肥市、芜湖市、青岛市、郑州市、新乡市、武汉市、襄阳市、长株潭地区、广州市、深圳市、海口市、成都市、重庆市、昆明市、西安市、兰州市；5个城市群分别是河北省城市群（石家庄、唐山、邯郸、保定、邢台、廊坊、衡水、沧州、承德、张家口)、福建省城市群（福州、厦门、漳州、泉州、三明、莆田、南平、龙岩、宁德、平潭)、浙江省城市群（杭州、金华、绍兴、湖州)、江西省城市群（南昌、九江、抚州、宜春、萍乡、上饶、赣州)和广东省城市群（佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门、肇庆)。

当前，我国电动汽车发展已进入关键时期，既面临重大的发展机遇，也面临着严峻的挑战。我国电动汽车发展中还存在很多需要解决的问题，如核心技术还不具竞争优势，企业投入不足，政府的协调统筹潜力还没有充分发挥等。总体看，我国电动汽车研发起步不晚，发展不慢，但由于传统汽车及相关产业基础相对薄弱、投入不足，差距仍在，中高端技术竞争压力越来越大。因此，必须加大攻坚力度，推动我国汽车工业向创新驱动转型，抢占技术制高点，培育新能源汽车战略性新兴产业，引领产业变革，确保我国汽车行业的可持续发展。

1.4　新能源汽车车型分析

根据各车企已发布的新能源汽车，选取了143款车型(其中混合动力汽车40款、插电式混合动力汽车25款、纯电动汽车71款、增程式电动汽车7款)，对其相关配置和性能进行统计分析。所选取的车型基于但不局限于中国市场，分属于中系、日系、欧系、美系和韩系等。其中中系车型既包括吉利、奇瑞、比亚迪等自主企业的车型，也包括一汽、东风、上汽等企业推出的自主车型(不含中资和外资共同推出的合资自主车型)；日系包括丰田、本田、日产、三菱、马自达等企业的车型；欧系包括大众、奔驰、奥迪、标致、雪铁龙、保时捷、宝马等企业的车型；美系主要指通用和福特等企业的车型；韩系包括现代、起亚的车型，具体见表1-1。

表 1-1 各车型的数量

系别	混合动力汽车	插电式混合动力汽车	纯电动汽车	增程式电动汽车
中系	5	7	35	2
日系	13	4	10	1
欧系	14	8	20	4
美系	6	5	4	—
韩系	2	1	2	—
合计	40	25	71	7

1. 混合动力汽车

混合动力汽车是指可使用内燃发动机(汽油或柴油)驱动和电力驱动两种驱动方式的车辆。该车型的优点是技术难度较低、易于推广。混合动力汽车只在一定路程范围内使用电力。各大汽车厂基本都有混合动力汽车的研发计划。目前世界上最成功的混合动力汽车无疑是丰田的普锐斯。

(1) 各车系所占比例及布置形式。中国目前将混合动力汽车定义为节能汽车，相关的支持和补贴的力度有限，因此国内车企对外发布的混合动力车型数量比较有限。日本和欧洲的车企在混合动力汽车的研发中起步较早，技术较为成熟，推出的车型也较多，因此欧系和日系所占比例较高。在 40 款混合动力汽车中，欧系占 35%，日系占 33%，美系占 15%，中系占 12%，韩系占 5%。

在动力的布置形式上，以前置前驱方式为主，其次为前置后驱方式，高中端车型也有采用四驱的混合动力车型。在 40 款混合动力汽车中，前置前驱占 62%，前置后驱占 24%，四驱占 11%，后置后驱占 3%。

(2) 发动机。混合动力汽车的发动机排量以中大排量为主，在 40 款混合动力汽车中，1.6L 以下小排量发动机占 26%，1.6～2.0L 占 26%，2.0～3.0L 占 32%，3.0L 以上占 16%。造成小排量发动机比例低的原因一是混合动力系统匹配在大排量车型上的节能效果比较显著；二是混合动力系统匹配在大排量车型上对车辆价格的影响较小，更有利于市场的销售和推广。

混合动力汽车的发动机平均功率为 150.1kW，平均转矩为 267.5N·m。其功率和转矩分布图如图 1.1 和图 1.2 所示。

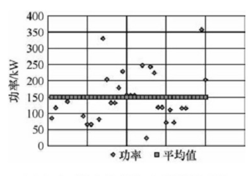


图 1.1 混合动力汽车发动机功率

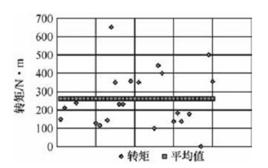


图 1.2 混合动力汽车发动机转矩

(3) 变速器。混合动力汽车主要以欧系和日系的中大排量车型为主，该排量区间的车



型多为匹配自动变速器的中高端车型，受此影响，混合动力汽车的变速器也以自动变速器为主，其次为无级变速器。在40款混合动力汽车中，自动变速器占58%，无级变速器占18%，单级变速器占15%，手动变速器占6%，双离合变速器占3%。

(4) 电动机。混合动力车型中采用的电动机大多是永磁电动机，电动机的平均功率为34.3kW，平均转矩为187.3N·m。如图1.3和图1.4所示。

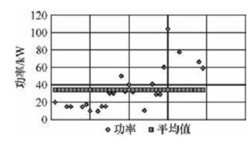


图1.3　混合动力汽车电动机功率

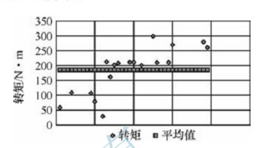


图1.4　混合动力汽车电动机转矩

(5) 电池。混合动力汽车最初使用的都是镍氢电池，随着技术的进步及提高电池性能的需要，现在锂离子电池的使用逐渐增加。在40款混合动力汽车中，镍氢电池占48%，锂离子电池占52%。混合动力汽车采用的电池能量较小，平均值约为1.27kW·h，如图1.5所示。

图1.5　混合动力汽车电池能量

(6) 续驶里程。混合动力汽车的电机功率和电池能量都比较小，主要用于起/停、加/减速等工况，因此混合动力车型的纯电续驶里程都非常短，通常在1～5km以内，部分车型甚至没有纯电行驶功能。

混合动力汽车的发动机、变速器、电动机和电池等基本动力情况及性能参数见表1-2。

表1-2　混合动力汽车主要动力配置及参数

项　目		数　值
发动机	主要排量/L	1.6以上
	平均功率/kW	150.1
	平均转矩/N·m	267.5
	布置形式	前置前驱
变速器	主要变速机构	自动变速器
电动机	类型	永磁同步电动机
	平均功率/kW	34.3
	平均转矩/N·m	187.3
电池	电池类型	镍氢电池、锂离子电池
	电池能量/kW·h	1.27
纯电续驶里程/km	很短，5km以内	

从混合动力汽车的电池能量及电机的参数可以看出，混合动力汽车的电动机和电池主要起瞬时起动及加速的作用。

2. 插电式混合动力汽车

插电式混合动力汽车可以视为在混合动力汽车的基础上，通过使用大功率电动机和较大容量的电池组并辅以外部充电接口而成。插电式混合动力汽车与混合动力汽车相比：插电式混合动力汽车的电池能量相对较大，并且可以外部充电，可以在纯电模式下行驶，电池电量耗尽后再以混合动力模式(以内燃机为主)行驶，并适时向电池充电。而普通混合动力汽车的电池容量很小，仅在起/停、加/减速时供应/回收能量，车上没有外接电源接口，也不能使用外部充电，混合动力汽车无法满足长距离纯电行驶的需求。

(1) 各车系所占比例及布置形式。我国目前将插电式混合动力汽车定义为新能源汽车，国家对插电式混合动力汽车按车载锂离子电池的容量进行补贴，补贴标准为3000元/kW·h，每辆车最高补贴为5万元，插电式混合动力汽车动力电池组能量不低于10kW时，纯电动模式下续驶里程不低于50km。因此国内车企发布的插电式混合动力车型比较多。在25款插电式混合动力汽车中，欧系占32%，中系占28%，美系占20%，日系占16%，韩系占4%。

驱动形式以前置前驱车型为主，欧系的插电式混合动力汽车多为中高端车型，因此四驱车型所占比例也较大。在25款插电式混合动力汽车中，前置前驱占62%，四驱占24%，后置后驱占9%，前置后驱占5%。

(2) 发动机。插电式混合动力汽车的发动机以小排量为主。在25款插电式混合动力汽车中，1.6L以下小排量发动机占61%，1.6～2.0L占26%，2.0～3.0L占9%，3.0L以上占4%。出现小排量发动机占较大比例的原因是插电式混合动力汽车匹配了较大功率的电动机和较大容量的锂离子电池组。

插电式混合动力汽车的发动机平均功率为99.2kW，平均转矩为166.3N·m。其功率和扭矩分布图如图1.6和图1.7所示。

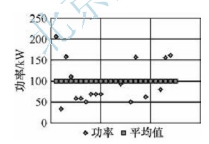


图1.6 插电式混合动力汽车发动机功率

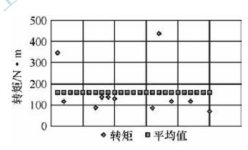
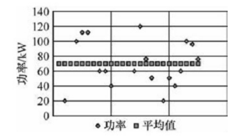


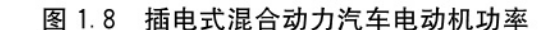
图1.7 插电式混合动力汽车发动机转矩

(3) 变速器。插电式混合动力汽车的变速器以单级变速机构为主，其次为自动变速器和双离合变速器。在25款插电式混合动力汽车中，单级变速器占44%，自动变速器占31%，双离合变速器占19%，无级变速器占6%。

(4) 电动机。插电式混合动力车型中采用的电动机大多是永磁电动机，电动机的平均功率为69.5kW，平均转矩为211.3N·m，如图1.8和图1.9所示。

(5) 电池。插电式混合动力汽车要延长车辆在纯电模式下的续驶里程，必须使用高能量密度的锂




图1.8 插电式混合动力汽车电动机功率

离子电池。在《私人购买新能源汽车试点财政补助资金管理暂行办法》中，明确说明采用铅酸电池不在补贴范围之内，但采用锂离子电池可获得国家财政补贴。目前，已公布的插电式混合动力车型使用的都是锂离子电池。插电式混合动力汽车比普通混合动力汽车采用的电池能量要大许多，平均值为 10.4kW·h，如图 1.10 所示。

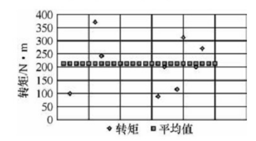


图 1.9　插电式混合动力汽车电动机转矩

18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
电池容量/kW·h
电池容量
平均值

图 1.10　插电式混合动力汽车电池能量

（6）纯电模式下续驶里程和最高车速。由于插电式混合动力汽车比普通混合动力汽车的电动机功率和电池能量都增大很多，因此插电式混合动力汽车的纯电续驶里程得到了加强，其平均续驶里程为 52.4km，如图 1.11 所示。在纯电动模式下，插电式混合动力汽车的最高平均速度为 136km/h，如图 1.12 所示。

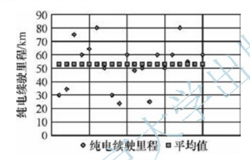


图 1.11　插电式混合动力汽车纯电模式续驶里程

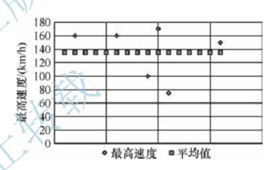


图 1.12　插电式混合动力汽车纯电模式行驶速度

插电式混合动力汽车的基本动力情况及性能参数见表 1－3。

表 1－3　插电式混合动力汽车主要动力配置及参数

项　　目		数　　值
发动机	主要排量/L	1.6 以下
	平均功率/kW	99.2
	平均转矩/N·m	166.3
变速器	主要变速机构	单级变速
主要布置形式	前置前驱	
电动机	类型	永磁同步电动机
	平均功率/kW	69.5
	平均转矩/N·m	211.3
电池	电池类型	锂离子电池
	电池能量/kW·h	10.4
纯电续驶里程/km	52.4	
纯电最高车速/(km/h)	136	

从表1-3可以看出，插电式混合动力汽车电池的平均能量及纯电模式下的续驶里程均满足《私人购买新能源汽车试点财政补助资金管理暂行办法》的要求。

3. 纯电动汽车

纯电动汽车是指彻底取消了发动机，仅通过车载电池提供能量、由电机驱动并可行驶较长距离的车辆。由于电能是纯电动汽车的唯一能量源，因此纯电动汽车的电池能量、电动机功率和扭矩均比插电式混合动力汽车要大。为给车辆提供外接电源，纯电动汽车通常同时具有慢速充电和快速充电两种充电模式。

(1) 各车系所占比例及布置形式。在纯电动汽车上，中系车所占比例最高。在71款纯电动汽车中，中系占49%，欧系占28%，日系占14%，美系占6%，韩系占3%。

电动汽车的驱动形式以前置前驱车型为主，以后置后驱为辅，前置后驱和四驱车型较少(仅部分车型或跑车采用四驱)。在71款纯电动汽车中，前置前驱占76%，后置后驱占20%，前置后驱和四驱分别占2%。

(2) 变速器。纯电动汽车基本采用的都是单级变速机构，为提高变速的范围并获得更好的舒适性，纯电动车的变速机构有从单机变速机构向两级变速机构过渡的趋势。

(3) 电动机。

纯电动汽车采用的电动机大多是永磁同步电动机，电动机的平均功率为73.5kW，平均转矩为223N·m，如图1.13和图1.14所示。

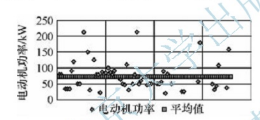


图1.13 纯电动汽车电动机功率

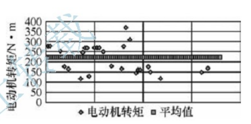


图1.14 纯电动汽车电动机转矩

(4) 电池。纯电动汽车要延长续驶里程，必须有大容量的锂离子电池组。纯电动汽车比插电式混合动力汽车采用的电池能量还要大，平均值为22.75kW·h，如图1.15所示。

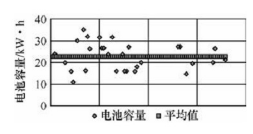


图1.15 纯电动汽车电池容量

(5) 续驶里程与最高车速。续驶里程和最高车速是考量纯电动车性能好坏的重要指标，同时也是影响其市场竞争力的重要因素。由于纯电动汽车在行驶中完全依靠车载锂离子电池组提供能量，为获得更好的续驶里程，对纯电动车的最高行驶速度一般有所限制。因此纯电动车的最高运行速度不一定高于插电式混合动力汽车，但续驶里程通常高于插电式混合动力汽车。

据统计，纯电动汽车平均续驶里程为189.2km，如图1.16所示。纯电动汽车的最高平均速度为129.8km/h，如图1.17所示。

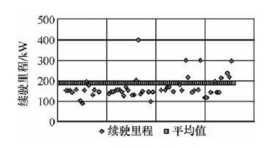


图 1.16　纯电动汽车续驶里程

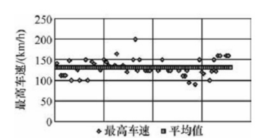


图 1.17　纯电动汽车最高行驶速度

根据分析，纯电动汽车的基本动力情况及性能参数见表 1－4。

表 1－4　纯电动汽车主要动力配置及参数

项　　目		数　　值
变速器	主要变速机构	单级变速
主要布置形式	前置前驱	
电动机	类型	永磁同步电动机
	平均功率/kW	73.5
	平均转矩/N·m	223
电池	电池类型	锂离子电池
	电池能量/kW·h	22.75
纯电续驶里程/km	189.2	
纯电最高车速/(km/h)	129.8	

纯电动汽车电池的平均能量为 22.75kW·h，均满足《私人购买新能源汽车试点财政补助资金管理暂行办法》中要求的电池能量不低于 15kW·h 的要求，同时也具备拿到最高 6 万元财政补贴的要求。

4. 增程式电动汽车

增程式电动汽车和纯电动汽车的驱动方式类似，也是依靠车载电池组提供能量由电机驱动。所不同的是，增程式电动汽车有一个车载发电装置，该装置目前主要是一台经过特殊标定的、可在最高燃油效率的运转模式下运转的小排量汽油机或柴油机发电机组。

增程式电动汽车由于既有纯电动汽车的锂离子电池组和电动机，也有内燃机汽车的车载发动机，因此既可以实现完全纯电行驶，也可以获得像汽油车或柴油车一样的续驶里程。增程式电动汽车本质上是一种特殊的插电式混合动力汽车。

(1) 发动机。增程式电动汽车车载发动机的排量一般在 1.0L 以下，基本都做过特殊标定，平均功率为 57.4kW，其主要功能为车辆的远距离运行提供电能。

(2) 变速器。增程式电动汽车的变速器与纯电动汽车类似，主要是单机变速机构。

(3) 电动机。电动机是增程式电动汽车的主要驱动机构，与插电式混合动力汽车和纯电动汽车一样，增程式电动汽车采用的也是永磁同步电动机，以前置前驱为主。主要车型电动机的平均功率和转矩分别为 67kW 和 190N·m。

(4) 电池。增程式电动汽车的锂离子电池组的平均能量是 19.4kW·h。

（5）最高车速与续驶里程。增程式电动汽车的最高平均车速为124km/h。增程式电动汽车的续驶里程与普通车辆基本无异，长达数百公里。

根据分析，增程式电动汽车的基本动力情况及性能参数见表1-5。

表1-5 增程式电动汽车主要动力配置及参数

项目		数值
发动机	主要排量/L	1.0以下
	平均功率/kW	57.4
变速器	主要变速机构	单级变速
主要布置形式	前置前驱	
电动机	类型	永磁同步电动机
	平均功率/kW	67
	平均转矩/N·m	190
电池	电池类型	锂离子电池
	电池能量/kW·h	19.4
纯电续驶里程/km	数百公里	
纯电最高车速/(km/h)	124	

增程式电动汽车的电池能量、电动机参数位于插电式混合动力汽车和纯电动汽车之间，可以认为增程式电动汽车是插电式混合动力汽车向纯电动汽车过渡的一种形式。

综上所述，以上车型特点可归纳如下。

（1）动力驱动布置形式：均以前置前驱为主。

（2）发动机：从混合动力汽车到插电式混合动力汽车、从增程式电动汽车到纯电动汽车，发动机的排量从大至小（与之相应的是发动机的功率和扭矩也是从大到小），直到取消发动机。从对石油燃料的节约利用来看，完全符合社会发展的趋势。

（3）变速器：混合动力汽车的变速机构是以自动变速器为主的传统变速器的天下，但已开始应用单级变速机构；在新能源汽车上，以可以实现简单操控的单级变速机构为主，为提高车辆的变速范围和为顾客提高更好的舒适性，新能源汽车的变速机构有从单级变速向两级变速过渡的趋势。

（4）电动机：在以确认的混合动力车型和新能源车型中，永磁同步电动机是毫无争议的主流选择；电动机的功率和扭矩等参数也按混合动力汽车、插电式混合动力汽车、增程式电动汽车和纯电动汽车的纯电驱动程度而增大。

（5）电池：经过多年的研究与应用，锂离子电池已成为混合动力汽车和新能源汽车的首选。电池的能量高低，对新能源汽车的续驶里程有直接影响。受制于目前锂离子电池的质量及成本，插电式混合动力汽车的电池平均能量为10.4kW·h，增程式电动汽车的电池平均能量为19.4kW·h，纯电动汽车的电池平均能量为22.75kW·h。

（6）纯电续驶里程：在一定范围内，纯电模式下的续驶里程和车载电池的容量呈线性关系，但考虑成本及车辆重量等因素，插电式混合动力汽车和纯电动汽车的续驶里程并非越长越好，而是要以符合车型的市场定位及车主的主要出行需求为原则。

(7) 纯电最高行驶速度：新能源汽车的纯电模式下的最高行驶速度取决于电动机的性能和电池的剩余电量。新能源汽车均有最经济的行驶速度，提高车辆的行驶速度有助于提升驾驶乐趣，但会影响车辆的续驶里程。从节能的角度考虑，对新能源汽车的最高行驶速度应有所限制。

1.5 新能源汽车技术路线及关键技术

在电动汽车科技发展“十二五”专项规划中，明确提出了我国电动汽车发展的技术路线和需要突破的关键技术。

1. 技术路线

电动汽车按动力系统电气化水平分为两类：一类是全部或大部分工况下主要由电动机提供驱动功率的电动汽车(称为“纯电驱动”电动汽车，例如纯电动汽车、插电式混合动力汽车、增程式电动汽车以及燃料电池电动汽车)；另一类是动力电池容量较小，大部分工况下主要由内燃机提供驱动功率的电动汽车(称为常规混合动力汽车)。从培育战略性新兴产业角度看，发展电气化程度比较高的“纯电驱动”电动汽车是我国新能源汽车技术的发展方向和重中之重。要在坚持节能与新能源汽车“过渡与转型”并行互动、共同发展的总体原则指导下，规划电动汽车技术发展战略。

(1) 确立“纯电驱动”的技术转型战略。顺应全球汽车动力系统电动化技术变革总体趋势，发挥我国的有利条件和比较优势，面向“纯电驱动”实施汽车产业技术转型战略，加快发展“纯电驱动”电动汽车产品。实施这一技术转型战略，要依靠自主创新，坚持自主发展，突破电动汽车核心技术瓶颈；同时要充分利用国际资源，进一步提升我国汽车共性基础技术水平，服务于“纯电驱动”的技术转型战略。

(2) 坚持“三纵三横”的研发布局。我国电动汽车研发在“三纵三横”的技术创新战略指导下，经过“十五”“三纵三横、整车牵头”和“十一五”“三纵三横、动力系统技术平台为核心”两阶段技术攻关，取得了重大技术突破，形成了中国特色的电动汽车研发体系。“十二五”期间，继续坚持“三纵三横”的基本研发布局，根据“纯电驱动”技术转型战略，进一步突出“三横”共性关键技术。在“三纵”方面，纯电动汽车、增程式电动汽车和插电式混合动力汽车作为纯电驱动汽车的基本类型归为一个大类；燃料电池电动汽车作为纯电驱动汽车的特殊类型继续独立作为一“纵”；混合动力汽车主要为常规混合动力汽车。在“三横”方面，“电池”包括动力电池和燃料电池；“电机”包括电机系统及其与发动机、变速器总成一体化技术等；“电控”包括“电转向”、“电空调”、“电制动”和“车网融合”等在内的电动汽车电子控制系统技术。

2. 关键技术

1) 电池

以动力电池模块为核心，实现我国以能量型锂离子动力电池为重点的车用动力电池大规模产业化突破。以车用能量型动力电池为主要发展方向，兼顾功率型动力电池和超级电容器的发展，全面提高动力电池输入输出特性、安全性、一致性、耐久性和性价比等综合性能。强化动力电池系统集成与热-电综合管理技术，促进动力电池模块化技术发展；实

现车用动力电池模块标准化、系列化、通用化，为支撑纯电驱动电动汽车的商业化运营模式提供保障。瞄准国际前沿技术，深入开展下一代新型车用动力电池自主创新研究，为电动汽车产业中长期发展进行技术储备。重点研究新型锂离子动力电池。研究新型锂离子动力电池设计、性能预测、安全评价及安全性新技术。新体系动力电池方面，重点研究金属空气电池、多电子反应电池和自由基聚合物电池等，并通过实验技术验证，建立动力电池创新发展技术研发体系。到2015年，为我国车用动力电池产业提升市场竞争能力提供科技支撑。通过新型锂离子动力电池和新体系电池的探索，确立我国下一代车用动力电池的主导技术路线。

突破燃料电池关键技术和系统集成，推进工程实用化，为新一代燃料电池汽车研发与产业化奠定核心技术基础。重点推进燃料电池的工程实用化，建立小批量生产线，进一步提升燃料电池性能，降低成本，强化电堆与系统的寿命考核，改进提高燃料电池系统控制策略与关键部件性能，提升燃料电池系统可靠性与耐久性，为燃料电池汽车示范运行提供可靠的车用燃料电池系统。加强燃料电池基础材料和系统集成科技创新，研发高稳定性、高耐久性、低成本的关键材料和部件。保证电堆在高电流密度下的均一性，提高功率密度，进一步增强系统的环境适应能力，为下一代燃料电池汽车研发奠定核心技术基础。

2）电机

面向混合动力大规模产业化需求，开发混合动力发动机/电机总成(发动机＋ISG/BSG)和机电耦合传动总成(电机＋变速器)，形成系列化产品和市场竞争力，为混合动力汽车大规模产业化提供技术支撑。面向纯电驱动大规模商业化示范需求，开发纯电动汽车驱动电机及其传动系统系列，同步开发配套的发动机发电机组(APU)系列，为实现纯电动汽车大规模商业示范提供技术支撑。面向下一代纯电驱动系统技术攻关，从新材料/新结构/自传感电机、IGBT芯片封装和驱动系统混合集成、新型传动结构等方面着手，开发高效率、高材料利用率、高密度和适应极限环境条件的电力电子、电机与传动技术，探索下一代车用电机驱动及其传动系统解决方案，满足电动汽车可持续发展需求。

3）电控

重点开发混合动力专用发动机先进控制算法(满足国Ⅳ以上排放法规)、混合动力系统先进实时控制网络协议、多部件间的转矩耦合和动态协调控制算法，研制高性能的混合动力系统(整车)控制器，满足混合动力汽车大规模产业化技术需求。重点开发先进的纯电驱动汽车分布式、高容错和强实时控制系统，高效、智能和低噪声的电动化总成控制系统(电动空调、电动转向、制动能量回馈控制系统)，电动汽车的车载信息、智能充电及其远程监控技术，满足纯电动汽车大规模示范需要。重点开发基于新型电机集成驱动的一体化底盘动力学控制、高性能的下一代整车控制器及其专用芯片、电动汽车智能交通系统(ITS)与车网融合技术(V2X，包括V2G：汽车到电网的链接，V2H：汽车到家庭的链接，V2V：汽车到汽车的链接等网络通信技术)，为下一代纯电驱动汽车开发提供技术支撑。

4）混合动力汽车

针对常规混合动力汽车大规模产业化需求，开展系列化混合动力系统总成开发，协调控制、能量管理等关键技术攻关和整车产品的产业化技术研发，将节能环保发动机开发与电动化技术有机结合，重点突破产品性价比，形成市场竞争优势。突破混合动力汽车产业化关键技术，构建混合动力汽车零部件配套保障体系，开展批量化生产装备与工艺、质量

管理体系以及配套的维修检测设备开发，建成混合动力汽车专用的装配、检测、检验生产线。

中度混合动力方面，突破混合动力汽车关键技术，深化发动机控制技术研究，解决动力源工作状态切换和动态协调控制，以及能源优化管理，掌握整车故障诊断技术，进一步提高整车的可靠性、耐久性、性价比，开发出高性价比、具有市场竞争力、可大规模产业化的混合动力汽车系列产品。

深度混合动力方面，突破混合动力系统构型技术及能量管理协调控制技术，开发深度混合动力新构型。开发出高性价比、可大规模批量生产的深度混合动力轿车和商用车产品。

5）纯电动汽车(含插电式/增程式电动汽车)

以小型纯电动汽车关键技术研发作为纯电动汽车产业化突破口，开发纯电动小型汽车系列产品(包括增程式)，并实现大规模商业化示范；开发公共服务领域纯电动商用车并大规模商业示范推广；加强插电式混合动力汽车研发力度，开发系列化插电式混合动力汽车和商用车系列产品。

小型纯电动汽车方面，针对大规模商业化示范需求，开发系列化特色纯电驱动车型及其能源供给系统，并探索新型商业化模式。实现小型纯电动汽车(含增程式)关键技术突破，重点掌握电气系统集成、动力系统匹配和整车热-电综合管理等技术。开发出舒适、安全、性价比高的小型纯电动汽车系列产品。

纯电动商用车方面，重点研究整车NVH、轻量化、热管理、故障诊断、容错控制与电磁兼容及电安全技术。

插电式混合动力汽车方面，掌握插电式混合动力构型及专用发动机系统研发技术；突破高效机电耦合技术、轻量化、热管理、故障诊断、容错控制与电磁兼容技术、电安全技术；开发出高性价比、可满足大规模商业化示范需求的插电式混合动力轿车和商用车系列产品。

6）以燃料电池汽车为代表的下一代纯电驱动汽车

集成下一代高性能电机与电池系统，突破下一代高性能新型纯电动轿车动力系统技术平台关键技术，到2015年左右，完成下一代高性能、纯电驱动动力系统技术平台，完成纯电驱动轿车和下一代高性能大型纯电动客车整车产品开发，技术水平处于国际先进水平。面向高端前沿技术突破需求，基于高功率密度、长寿命、高可靠性的燃料电池发动机技术，突破新型氢-电-结构耦合安全性等关键技术，攻克适应氢能源供给的新型全电气化底盘驱动系统平台技术，研制出达到国际先进水平的燃料电池轿车和客车，并进行示范考核；掌握车载供氢系统技术，实现关键部件的自主开发，掌握下一代燃料电池汽车动力系统平台技术，研制下一代燃料电池轿车和客车产品，并进行运行考核。



1. 什么是新能源汽车？新能源汽车包括哪些类型？
2. 为什么要发展新能源汽车？
3. 我国新能源汽车技术路线是什么？

第 2 章　电动汽车用动力电池

电池是电动汽车的动力源，是能量的存储装置，也是目前制约电动汽车发展的关键因素。要使电动汽车能与燃油汽车相竞争，关键是开发出比能量高、比功率大、使用寿命长、成本低的电池。

2.1　概　　述

2.1.1　电池分类

电池可以分为化学电池、物理电池和生物电池三大类。

1. 化学电池

化学电池是利用物质的化学反应发电。

化学电池按工作性质分为原电池、蓄电池、燃料电池和储备电池。

1）原电池

原电池又称一次电池，是指电池放电后不能用简单的充电方法使活性物质复原而继续使用的电池，如锌-二氧化锰干电池、锂锰电池、锌空气电池、一次锌银电池等。

2）蓄电池

蓄电池又称二次电池，是指电池在放电后可通过充电的方法使活性物质复原而继续使用的电池，这种充放电可以达数十次到上千次循环。如铅酸蓄电池、镍镉电池、镍氢电池、锂离子电池等。

3）燃料电池

燃料电池又称连续电池，是指参加反应的活性物质从电池外部连续不断地输入电池，电池就连续不断地工作而提供电能。如质子交换膜燃料电池、碱性燃料电池、磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池、直接甲醇燃料电池、再生型燃料电池等。

4）储备电池

储备电池是指电池正负极与电解质在储存期间不直接接触，使用前注入电解液或者使用其他方法使电解液与正负极接触，此后电池进入待放电状态，如镁电池、热电池等。

化学电池按电解质分为酸性电池、碱性电池、中性电池、有机电解质电池、非水无机电解质电池、固体电解质电池等。

化学电池按电池的特性分为高容量电池、密封电池、高功率电池、免维护电池、防爆电池等。

化学电池按正负极材料分为锌锰电池系列、镍镉镍氢系列、铅酸系列、锂电池系列等。

2. 物理电池

物理电池是利用光、热、物理吸附等物理能量发电的电池，如太阳能电池、超级电容器、飞轮电池等。

3. 生物电池

生物电池是利用生物化学反应发电的电池，如微生物电池、酶电池、生物太阳电池等。

迄今已经实用化的车用动力蓄电池有传统的铅酸蓄电池、镍镉电池、镍氢电池和锂离子电池。在物理电池领域中，超级电容器也应用于纯电动汽车和混合动力汽车中。生物燃料电池在车用动力中应用前景也十分广阔，以氢为燃料的燃料电池和氧化物燃料电池的研发已进入重要发展阶段。

2.1.2 电池的性能指标

电池作为电动汽车的储能动力源，在电动汽车上发挥着非常重要的作用，要评定电池的实际效应，主要是看电池的性能指标。电池的性能指标主要有电压、容量、内阻、能量、功率、输出效率、自放电率、使用寿命等，根据电池种类不同，其性能指标也有差异。

1. 电压

电压分为端电压、开路电压、额定电压、放电电压、充电终止电压和放电终止电压等。

1）端电压

电池的端电压是指电池正极与负极之间的电位差。

2）开路电压

电池在开路状态下的端电压称为开路电压，即电池在没有负载情况下的端电压。

3）额定电压

额定电压是指电池在标准规定条件下工作时应达到的电压，镍镉电池和镍氢电池的额定电压为1.2V，锂离子电池的额定电压为3.6V。

4）放电电压

电池的放电电压是指电池接通负载后在放电过程中显示的电压，又称工作电压。在电池放电初始的工作电压称为初始电压。

5）充电终止电压

蓄电池充足电时，极板上的活性物质已达到饱和状态，再继续充电，电池的电压也不会上升，此时的电压称为充电终止电压。镍镉电池的充电终止电压为1.75～1.8V，镍氢电池的充电终止电压为1.5V，锂离子电池的充电终止电压为4.25V。

6）放电终止电压

放电终止电压是指电池在一定标准所规定的放电条件下放电时，电池的电压将逐渐降低，当电池再不宜继续放电时，电池的最低工作电压称为终止电压。如果电压低于放电终止电压后电池继续放电，电池两端电压会迅速下降，形成深度放电。这样，极板上形成的生成物在正常充电时就不易再恢复，从而影响电池的寿命。放电终止电压和放电率有关，

放电电流直接影响放电终止电压。在规定的放电终止电压下，放电电流越大，电池的容量越小。镍镉电池的放电终止电压一般在1.0～1.1V，镍氢电池的放电终止电压一般规定为1V，锂离子电池的放电终止电压为3.0V。

2. 容量

电池在一定的放电条件下所能放出的电量称为电池的容量。常用单位为安时(A·h)，它等于放电电流与放电时间的乘积。电池的容量可以分为理论容量、实际容量、标称容量和额定容量等。

1）理论容量

理论容量是把活性物质的质量按法拉第电磁感应定律计算而得到的最高理论值。为了比较不同系列的电池，常用比容量的概念，即单位体积或单位质量电池所能给出的理论电量，单位为A·h/L或A·h/kg。

2）实际容量

实际容量是指电池在一定条件下所能输出的电量，它等于放电电流与放电时间的乘积，单位为Ah，其值小于理论容量。

实际容量反映了电池实际存储电量的大小，电池容量越大，电动汽车的续驶里程就越远。在使用过程中，电池的实际容量会逐步衰减。国家标准规定：新出厂的电池实际容量大于额定容量值为合格电池。

3）标称容量

标称容量是用来鉴别电池的近似安时值。

4）额定容量

额定容量也称保证容量，是按国家或有关部门颁布的标准，保证电流在一定的放电条件下应该放出的最低限度的容量。

按照IEC标准和国家标准，镍镉和镍氢电池在(20±5)°C条件下，以0.1C充电16h后以0.2C放电至1.0V时所放出的电量为电池的额定容量，以C表示；锂离子电池在常温、恒流(1C)、恒压(4.2V)条件下充电3h后再以0.2C放电至2.75V时所放出的电量为电池的额定容量。

5）荷电状态

荷电状态(SOC)是电池在一定放电倍率下，剩余电量与相同条件下额定容量的比值。反映电池容量的变化。SOC=1即表示电池充满状态。随着电池的放电，电池的电荷数逐渐减少，此时电池的充电状态，可以用SOC的百分数的相对量来表示电池中电荷的变化状态。一般电池放电高效率区为(50%～80%)SOC。

3. 内阻

电池的内阻是指电流流过电池内部时所受到的阻力。电池内阻越大，电池自身消耗掉的能量越多，电池的使用效率越低。内阻很大的电池在充电时发热很厉害，使电池的温度急剧上升，对电池和充电器的影响都很大。随着电池使用次数的增多，由于电解液的消耗及电池内部化学物质活性的降低，电池的内阻会有不同程度的升高。

4. 能量

电池的能量是指在一定放电制度下，电池所能输出的电能，单位是W·h或kW·h。



它影响电动汽车的行驶距离。

1）理论能量

理论能量是电池的理论容量与额定电压的乘积，指一定标准所规定的放电条件下，电池所输出的能量。

2）实际能量

实际能量是电池实际容量与平均工作电压的乘积，表示在一定条件下电池所能输出的能量。

3）比能量

比能量也称质量比能量，是指电池单位质量所能输出的电能，单位是 W·h/kg。常用比能量来比较不同的电池系统。

比能量有理论比能量和实际比能量之分。理论比能量是指 1kg 电池反应物质完全放电时理论上所能输出的能量；实际比能量是指 1kg 电池反应物质所能输出的实际能量。由于各种因素的影响，电池的实际比能量远小于理论比能量。

电池的比能量是综合性指标，它反映了电池的质量水平。电池的比能量影响电动汽车的整车质量和续驶里程，是评价电动汽车的动力电池是否满足预定的续驶里程的重要指标。

4）能量密度

能量密度也称体积比能量，是指电池单位体积所能输出的电能，单位是 W·h/L。

5. 功率

电池的功率是指电池在一定放电制度下，单位时间内所输出能量的大小，单位为 W 或 kW。电池的功率决定了电动汽车的加速性能和爬坡能力。

1）比功率

单位质量电池所能输出的功率称为比功率，也称质量比功率，单位为 W/kg 或 kW/kg。

2）功率密度

单位体积电池所能输出的功率称为功率密度，也称体积比功率，单位为 W/L 或 kW/L。

6. 输出效率

动力电池作为能量存储器，充电时把电能转化为化学能储存起来，放电时把电能释放出来。在这个可逆的电化学转换过程中，有一定的能量损耗。通常用电池的容量效率和能量效率来表示。

1）容量效率

容量效率是指电池放电时输出的容量与充电时输入的容量之比，即

$$\eta_c = \frac{C_{放}}{C_{充}} \times 100\% \tag{2-1}$$

式中，η_c 为电池的容量效率；$C_{放}$ 为电池放电时输出的容量；$C_{充}$ 为电池充电时输入的容量。

影响电池容量效率的主要因素是副反应。当电池充电时，有一部分电量消耗在水的分解上。此外，自放电、电极活性物质的脱落、结块、孔率收缩等也降低容量输出。

2）能量效率

能量效率也称电能效率，是指电池放电时输出的能量与充电时输入的能量之比，即

$$\eta_w = \frac{W_{放}}{W_{充}} \times 100\% \tag{2-2}$$

式中，η_w 为电池的能量效率；$W_{放}$ 为电池放电时输出的能量；$W_{充}$ 为电池充电时输入的能量。

影响能量效率的原因是电池存在内阻，它使电池充电电压增加，放电电压下降。内阻的能量损耗以电池发热的形式损耗掉。

7. 自放电率

自放电率是指电池在存放期间容量的下降率，即电池无负荷时自身放电使容量损失的速度。自放电率用单位时间容量降低的百分数表示，其表达式为

$$自放电率 = \frac{C_a - C_b}{C_a \times T} \times 100\% \tag{2-3}$$

式中，C_a 为电池存储前的容量(A・h)；C_b 为电池存储后的容量(A・h)；T 为电池存储的时间，常用日、月计算。

8. 放电倍率

电池放电电流的大小常用“放电倍率”表示，即电池的放电倍率用放电时间表示或者说以一定的放电电流放完额定容量所需的小时数来表示，由此可见，放电时间越短，即放电倍率越高，则放电电流越大。

放电倍率等于额定容量与放电电流之比。根据放电倍率的大小，可分为低倍率($<0.5C$)、中倍率($0.5\sim3.5C$)、高倍率($3.5\sim7.0C$)、超高倍率($>7.0C$)。

例如：某电池的额定容量为20A・h，若用4A电流放电，则放完20A・h的额定容量需用5h，也就是说以5倍率放电，用符号$C/5$或$0.2C$表示，为低倍率。

9. 使用寿命

使用寿命是指电池在规定条件下的有效寿命期限。电池发生内部短路或损坏而不能使用，以及容量达不到规范要求时电池使用失效，这时电池的使用寿命终止。

电池的使用寿命包括使用期限和使用周期。使用期限是指电池可供使用的时间，包括电池的存放时间。使用周期是指电池可供重复使用的次数。

除此之外，成本也是一个重要的指标。电动汽车发展的瓶颈之一就是电池价格高。

2.1.3 电动汽车对动力电池的要求

电动汽车对动力电池的要求主要有：

(1) 比能量高。为了提高电动汽车的续驶里程，要求电动汽车上的动力电池尽可能储存多的能量，但电动汽车又不能太重，其安装电池的空间也有限，这就要求电池具有高的比能量。

(2) 比功率大。为了能使电动汽车在加速行驶、爬坡能力和负载行驶等方面能与燃油汽车相竞争，就要求电池具有高的比功率。

(3) 循环寿命长。循环寿命越长，则电池在正常使用周期内支撑电动汽车行驶的里程

数就越多，有助于降低车辆使用期内的运行成本。

(4) 均匀一致性好。对于电动汽车而言，电池组的工作电压大多均应达到数百伏，这就要求至少有几十到上百只电池的串联。为达到设计容量要求，有时甚至需要更多的单体并联。由于电池组的使用性能会受到性能最差的某些单节电池的制约，因此设计上要求各电池单体在容量、内阻、功率特性和循环特性等方面具有高度的均匀一致性。

(5) 高低温性能好、环境适应性强。电动汽车作为一种交通工具，要求电池既要在北方冬天极冷的气温下，又要在南方夏天炎热环境中长期稳定地工作。在最恶劣的气候条件下，电池的工作温度可能要从－40℃变到 60℃，甚至 80℃。因此，要求电池应当具有良好的高低温特性。

(6) 安全性好。能够有效避免因泄漏、短路、撞击、颠簸等引起的起火或爆炸等危险事故发生，确保汽车在正常行驶或非正常行驶过程中的安全。

(7) 价格低廉。包括材料来源丰富，电池制造成本低，以降低整车价格，提高电动汽车的市场竞争力。

(8) 绿色、环保。要求电池制作的材料与环境友好、无二次污染，并可再生利用。

1991 年，美国先进电池开发联合体(USABC)对电动汽车用动力电池制定的开发目标，见表 2－1。

表 2－1 USABC 开发目标

性能参数	中期目标	长期目标
能量密度/(W·h/L)	135	300
比能量/(W·h/kg)	80～100	200
功率密度/(W/L)	250	600
比功率/(W/kg)	150～200	400
使用寿命/a	5	10
循环寿命/次	600	1000
正常充电时间/h	＜6	3～6
工作循环温度/℃	－30～65	－40～80

目前，虽然有些电池的性能参数已经超过了开发目标，但距离大规模推广应用还有很多问题需要解决，电动汽车动力电池普遍存在安全性得不到保障、电池容量满足不了续驶里程的需要、电池循环寿命短、电池质量和尺寸较大、电池价格昂贵等问题，这些问题都有待进一步解决。

2010 年，工信部颁发了先进动力电池系统规格和等级：工作温度：－20～55℃；储存和运输温度：－40～80℃；比能量≥90W·h/kg(以电池包总体计)；最大放电倍率≥5C；最大充电倍率≥3C；循环寿命≥2000 次(单体)，1200 次(系统)。

2.2 铅酸蓄电池

2.2.1 电动汽车用铅酸蓄电池的发展动态

铅酸蓄电池的应用历史最长，也是最成熟、成本售价最低廉的蓄电池。它已实现大批量生产，但比能量低，所占的质量和体积太大，且一次充电行驶里程较短，自放电率高，循环寿命低，不适合现代电动汽车发展的需要。

随着铅酸蓄电池技术的发展，适合电动汽车使用的各种新型铅酸蓄电池不断出现，其性能不断提高。尤其是第三代阀控式密封铅酸蓄电池(Valve-regulated Lead Acid Battery，VRLA)，比能量达到50W·h/kg，比功率达到500W/kg，循环寿命大于900次。

VRLA蓄电池具有下列结构特点：

(1) 用新板栅材料，负极板栅采用铅-钙合金，以提高析氢过电位，正极板栅用铅基多元合金，用于改善点特性。

(2) 改变正、负极板活性物质电化当量配比，设计为以负极板容量相对于正极板过剩。

(3) 电池为贫液设计。电池盖上装单向节流阀，使电池处于密封状态，遇到异常情况时排气阀打开排出气体。

经过技术改进的VRLA蓄电池具有下列新功能：无酸雾逸出；无需定期进行补水；比能量大；自放电小；浮充寿命长。目前，这种蓄电池已应用在轻度混合的混合动力汽车上。

先进铅酸蓄电池联盟(Advanced Lead-acid Battery Consortium，ALABC)组织了澳大利亚CSIRO、美国Hawker公司对VRLA动力电池进行了几年的攻关，提出了解决方案，并在丰田Prius、本田Insight等混合动力汽车上作了两年多的道路运行试验，证明性能良好，成功地用卷绕式VRLA电池代替了Ni-MH电池。

世界各国的电动汽车用新型VRLA铅酸蓄电池的进展如下。

(1) 日本公司开发的电动汽车用新型VRLA蓄电池，其电压规格有单体2V和4V，采用贫液式和极板水平设计。板间距很小，不会出现电解液分层，脱落物质向下移动有极板挡住，电池底部无脱落物堆积。

(2) 德国阳光公司的电动汽车用铅酸蓄电池采用胶体电解质设计，经检测其6V、160A·h电池的预期寿命可达到4年，具有热容量大、温升小等优点。

(3) 美国Arias公司于1994年推出双极性电动汽车用铅酸蓄电池，其结构技术独特。这种电池的工作电流只垂直于电极平面而通过薄的双电极，所以具有极小的欧姆电阻。

(4) 美国BPC公司开发的双极性电动汽车用铅酸蓄电池技术参数为：组合电压为180V，电池容量为60A·h，放电率比能量为50W·h/kg，循环寿命可达到1000次。

(5) 瑞典OPTIMA公司推出的卷式电动汽车用铅酸蓄电池，产品容量为56A·h，启动功率可达到95kW，比普通的195A·h的VRLA蓄电池启动功率还要大，而体积小1/4。

由于铅酸蓄电池的缺点，一些专家学者和相关企业已经开始把目光转向其他的动力电池研究，他们认为铅酸蓄电池将逐步退出电动汽车市场。近年来，为适应储能与动力的需要，国外铅酸蓄电池新技术不断问世，如嵌入电容电极的“超级电池”使电池的功率特性

提高；泡沫碳板栅使电池的比能量增加；新组分铅合金使电池的循环寿命可长达数千次；环保型生产工艺正在改变铅酸蓄电池“污染环境”的形象。美国总统奥巴马宣布拨款24亿美元支持美国48个项目发展“下一代电池和电动汽车”，其中用于电池及其材料生产的为15亿美元。细观其内容，铅酸蓄电池也在“下一代电池”内。只不过该计划支持的是“超级电池”。所谓“超级电池”是将超级电容器与铅酸蓄电池的并联使用(可称“外并”)，进化为“内并”，就是将双电层电容器的高比功率、长寿命的优势融合到铅酸蓄电池中，在保持“外并”提高功率、延长电池寿命优点的同时，又能简化电路，提高比能量，并降低总费用。“超级电池”内的用铅量也比现有铅酸蓄电池大为减少，再有了政府的支持，铅酸蓄电池依然具有市场竞争力。

目前我国铅酸蓄电池技术的研究主要集中在三个方面，一是铅酸蓄电池的基础研究，包括近年来发展的许多铅酸蓄电池新技术——泡沫炭板栅、泡沫铅板栅、新型负极添加剂、超级电池新技术、铅碳电池新技术、双极陶瓷隔膜电池等；二是铅酸蓄电池环境治理和职业卫生，铅酸蓄电池生产中的污染是有治理技术的，也是能够治理的；三是铅酸蓄电池的具体应用。

2010年4月召开的首届全国铅酸蓄电池新技术研讨会指出：全球铅酸蓄电池市场目前仍处于稳定增长阶段。铅酸蓄电池产品如此长盛不衰，除技术成熟、性价比高、安全可靠、功率特性和原料再生性好等突出优点外，还与它在竞争中技术不断提高密切相关。虽然我国近几年也引进了一些铅酸蓄电池新装备，但铅酸蓄电池新技术的研发在国内受到冷落，与国外的差距逐渐拉大。中国铅酸蓄电池存在三方面问题：寿命不长，污染严重，比能量和比功率不高。

目前我国铅酸蓄电池未来努力方向是：延寿、摘帽、加力。延长寿命是铅酸蓄电池节能减排的最有效途径。未来人类依赖的是可再生能源，必须要通过规模储能来调节可再生能源的连续性和稳定性，就迫切需要长寿命电池，这样才能最有效地降低蓄电池成本，推动可再生能源的发展。二是要摘掉污染的帽子。要严格控制生产许可证的发放，以高度的社会责任心，舍得必要的投入来治理污染，那些只搬迁工厂而不治理污染的做法很不好。铅酸蓄电池的污染还发生在落后的冶炼和废旧电池的再生中，一些有效的新的回收技术应当工程化和产业化。三是要提高比功率、比能量和其他性能。在过去电动自行车的大发展当中，铅酸蓄电池大显神威，铅酸蓄电池要全面提高性能，才能在前景广阔的电动汽车中大显身手，产生巨大的经济效益和社会效益。我们要抓住这历史性的机遇，就必须在技术上有突破。总之，要使铅酸蓄电池在各类电池的竞争中站住脚跟，要在中国消除对铅酸蓄电池的偏见，就要使铅酸蓄电池技术不断进步。

铅酸蓄电池由于其价格低廉，目前主要应用在速度不高、路线固定、充电站设立容易规划的电动车辆上。

2.2.2 铅酸蓄电池的分类与结构

1. 铅酸蓄电池的分类

铅酸蓄电池分为免维护铅酸蓄电池和阀控密封式铅酸蓄电池。

1）免维护铅酸蓄电池

免维护铅酸蓄电池由于自身结构上的优势，电解液的消耗量非常小，在使用寿命内基

本不需要补充蒸馏水。它具有耐振、耐高温、体积小、自放电小的特点。使用寿命一般为普通铅酸蓄电池的两倍。市场上的免维护铅酸蓄电池也有两种：一种是在购买时一次性加电解液以后使用中不需要添加补充液；另一种是电池本身出厂时就已经加好电解液并封死，用户根本就不能加补充液。

2) 阀控密封式铅酸蓄电池

阀控密封式铅酸蓄电池在使用期间不用加酸加水维护，电池为密封结构，不会漏酸，也不会排酸雾，电池盖子上设有溢气阀(也称安全阀)，该阀的作用是当电池内部气体量超过一定值，即当电池内部气压升高到一定值时，溢气阀自动打开，排出气体，然后自动关闭，防止空气进入电池内部。

阀控密封式铅酸蓄电池分为 AGM 和 GEL(胶体)电池两种。AGM 采用吸附式玻璃纤维棉(absorbed glass mat)作隔膜，电解液吸附在极板和隔膜中，电池内无流动的电解液，电池可以立放工作，也可以卧放工作；胶体(GEL)以 SiO_2 作凝固剂，电解液吸附在极板和胶体内，一般立放工作。如无特殊说明，阀控密封式铅酸蓄电池皆指 AGM 电池。

电动汽车使用的动力电池一般是阀控密封式铅酸蓄电池。

2. 铅酸蓄电池的结构

铅酸蓄电池的基本结构如图 2.1 所示。它由正负极板、隔板、电解液、溢气阀、外壳等部分组成。极板是铅酸蓄电池的核心部件，正极板上的活性物质是二氧化铅，负极板上的活性物质为海绵状纯铅。隔板是隔离正、负极板，防止短路；作为电解液的载体，能够吸收大量的电解液，起到促进离子良好扩散的作用；它还是正极板产生的氧气到达负极板的“通道”，以顺利建立氧循环，减少水的损失。电解液由蒸馏水和纯硫酸按一定比例配制而成，主要作用是参与电化学反应，是铅酸蓄电池的活性物质之一。电池槽中装入一定密度的电解液后，由于电化学反应，正、负极板间会产生约为 2.1V 的电动势。溢气阀位于电池顶部，起到安全、密封、防爆等作用。

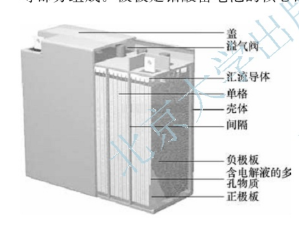


图 2.1 铅酸蓄电池的基本结构

2.2.3 铅酸蓄电池的特点

1. 铅酸蓄电池的优点

铅酸蓄电池有以下优点：

(1) 除锂离子电池外，在常用蓄电池中，铅酸蓄电池的电压最高，为 2.0V；

(2) 价格低廉；

(3) 可制成小至 1A·h 大至几千安时的各种尺寸和结构的蓄电池；

(4) 高倍率放电性能良好，可用于引擎启动；

(5) 高低温性能良好，可在－40～60℃条件下工作；

(6) 电能效率高达 60％；

(7) 易于浮充使用，没有“记忆”效应；

(8) 易于识别荷电状态。

2. 铅酸蓄电池的缺点

铅酸蓄电池有以下缺点：

(1) 比能量低，在电动汽车中所占的质量和体积较大，一次充电行驶里程短；
(2) 使用寿命短，使用成本高；
(3) 充电时间长；
(4) 铅是重金属，存在污染。

2.2.4 铅酸蓄电池的工作原理

铅酸蓄电池使用时，把化学能转换为电能的过程叫放电。在使用后，借助于直流电在电池内进行化学反应，把电能转变为化学能而储蓄起来，这种蓄电过程称作充电。铅酸蓄电池是酸性蓄电池，其化学反应式为

$$PbO+H_2SO_4 = PbSO_4\downarrow+H_2O$$

充电时，把铅板分别和直流电源的正、负极相连，进行充电电解，阴极的还原反应为

$$PbSO_4+2e^- = Pb+SO_4^{2-}$$

阳极的氧化反应为

$$PbSO_4+2H_2O = PbO_2+4H^++SO_4^{2-}+2e^-$$

充电时的总反应为

$$2PbSO_4+2H_2O = Pb+PbO_2+2H_2SO_4$$

随着电流的通过，$PbSO_4$ 在阴极上变成蓬松的金属铅，在阳极上变成黑褐色的二氧化铅，溶液中有 H_2SO_4 生成，如图 2.2 所示。

放电时蓄电池阴极的氧化反应为

$$Pb = Pb^{2+}+2e^-$$

由于硫酸的存在，Pb^{2+} 立即生成难溶解的 $PbSO_4$。

阳极的还原反应为

$$PbO_2+4H^++2e^- = Pb^{2+}+2H_2O$$

同样，由于硫酸的存在，Pb^{2+} 也立即生成 $PbSO_4$。

放电时总的反应为

$$Pb+PbO_2+2H_2SO_4 = 2PbSO_4\downarrow+2H_2O$$

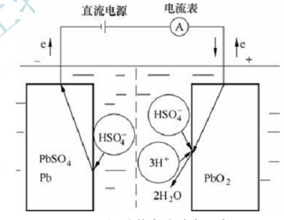


图 2.2 铅酸蓄电池放电示意图

蓄电池充电的时候，随着电池端电压的升高，水开始被电解，当电池电压每单体达到约 2.39V 时，水的电解不可忽视。水电解时阳极和阴极的化学反应式分别为

$$H_2O = \frac{1}{2}O_2+2H^++2e^-$$

$$2H^++2e^- = H_2$$

阳极给出电子，阴极得到电子，从而形成了回路电流。端电压越高，水的电解也越激烈，此时充入的大部分电荷参加水电解，形成活性物质很少。

2.2.5 铅酸蓄电池的充放电特性

1. 铅酸蓄电池的放电特性

在铅酸蓄电池不放电的情况下，蓄电池中的活性物质微孔中的电解液 H_2SO_4 的密度与极板外的电解液密度相同。铅酸蓄电池开始放电，活性物质表面的电解液密度立即下降，而极板外的电解液是缓慢地向活性物质表面扩散，不能立即补偿活性物质表面电解液的密度，随着放电过程的进行，活性物质表面的电解液密度继续下降，结果导致蓄电池的端电压下降，如图 2.3 中 AB 段所示。

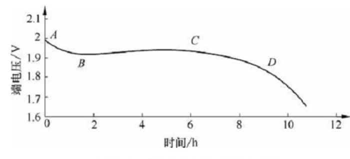


图 2.3 铅酸蓄电池的放电曲线

蓄电池继续放电，在活性物质表面的电解液浓度下降的同时，极板外的电解液向活性物质表面扩散，补充了活性物质表面的电解液的浓度并保持了一定的浓度，活性物质表面的电解液的浓度变化缓慢，使蓄电池的端电压也随即保持稳定，如图 2.3 中 BC 段所示。

蓄电池继续放电，极板外的电解液的整体浓度也逐渐降低，在活性物质表面的电解液的浓度也随之降低。又由于电解液和活性物质被消耗，其作用面积也不断地减小，结果是蓄电池的端电压也随着下降，如图 2.3 中 CD 段所示。

在放电末尾阶段，正、负电极上的活性物质逐渐转变为 $PbSO_4$，$PbSO_4$ 的生成使活性物质孔隙率降低，使活性物质与 H_2SO_4 的接触更加困难，并且由于 $PbSO_4$ 使不良导体蓄电池的内阻增加，当蓄电池的端电压达到 D 点后，蓄电池的端电压急剧下降，达到所规定的终止电压。

蓄电池的放电与放电电流有密切关系，大电流放电时，蓄电池的电压下降明显，平缓部分缩短，曲线的斜率也很大，放电时间缩短；随着放电电流的减小，蓄电池的电压呈下降趋缓，曲线也较平缓，放电时间延长。这种放电特性对蓄电池的正确使用有重要的意义。

2. 铅酸蓄电池的充电特性

在蓄电池充电开始后，首先活性物质表面的 $PbSO_4$ 转换为 Pb，并在活性物质表面附近生成 H_2SO_4，蓄电池的端电压迅速地上升，如图 2.4 中 AB 段所示。当达到 B 点以后，活性物质表面和微孔内的 H_2SO_4 浓度平缓地增加，蓄电池的端电压上升也比较缓慢，如图 2.4 中 BC 段所示。随着充电过程继续进行，达到充电量 90%左右，反应的极化增加，蓄电池的端电压明显地再次上升，如图 2.4 中 CD 段所示，这时蓄电池的端电压达到 D 点，蓄电池的两极开始大量析出气体。超过 D 点以后进行的电解过程，蓄电池的端电压又达到一个新的稳定值。

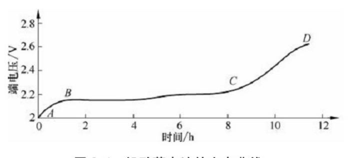


图 2.4 铅酸蓄电池的充电曲线

蓄电池充电还受到充电电流条件的影响，充电电流越大，活性物质的反应越快，反应生成的 H_2SO_4 速度越快，浓度增加越快，蓄电池的端电压上升越快。一般来说用较大的电流来充电时，固然可以加快充电过程，但能量的损失也大，在充电终期大部分的电能用于产生热量和分解水。另外，用较大的电流来充电时在电极上的电流的分布也越加不均匀，电流分布多的部分活性物质的反应越快，电流分布少的部分活性物质不能充分转化。所以，在蓄电池充电的后期应减少充电电流。

另外，蓄电池充电时蓄电池端电压的变化，是随充电时电流强度变化而变化，电流强度大，蓄电池端电压也高，电流强度小，蓄电池端电压也较低。

2.2.6 铅酸蓄电池的充电方法

蓄电池的充电可以分为常规充电和快速充电两种。

1. 蓄电池常规充电方法

蓄电池的常规充电方法主要有恒流充电法、分段电流充电法、恒压充电法、恒压限流充电法等。

1）恒流充电法

恒流充电法是通过调整充电装置输出电压或改变与蓄电池串联电阻的方式使充电电流强度保持不变的充电方法。该方法控制简单，但由于蓄电池的可接受电流能力是随着充电过程的进行而逐渐下降的，到充电后期，充电电流多用于电解水，产生气体，使析气过甚，此时电能不能有效转化为化学能，多变为热能消耗掉了。因此，常选用阶段充电法。恒流充电曲线如图 2.5 所示，充电电流选择 10 小时率或 20 小时率。

恒流充电法能使蓄电池充电比较彻底，但需经常调节充电电压，且充电时间较长。

2）分段电流充电法

在充电过程中，为更有效地利用电能而用逐渐减小电流的方法。考虑到蓄电池具体情况，一般分为数段进行充电，如二阶段充电法和三阶段充电法。

(1) 二阶段充电法。二阶段充电法采用恒电流和恒电压相结合的方法快速充电，如图 2.6所示。首先，以恒电流充电至预定的电压值，然后，改为恒电压完成剩余的充电。一般两阶段之间的转换电压就是第二阶段的恒电压。

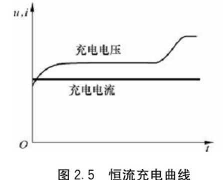


图 2.5 恒流充电曲线

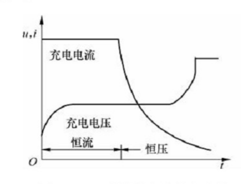


图 2.6 二阶段充电法充电曲线

(2) 三阶段充电法。三阶段充电法在充电开始和结束时采用恒电流充电，中间用恒电压充电。当电流衰减到预定值时，由第二阶段转换到第三阶段。这种方法可以将出气量减到最少，但作为一种快速充电方法使用，受到一定的限制。

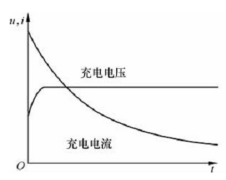


图 2.7 恒压充电法曲线

3）恒压充电法

充电电源的电压在全部充电时间里保持恒定的数值，随着蓄电池端电压的逐渐升高，电流逐渐减少。与恒流充电法相比，其充电过程更接近于最佳充电曲线。用恒定电压快速充电，如图 2.7 所示。由于充电初期蓄电池电动势较低，充电电流很大，随着充电的进行，电流将逐渐减少，因此，只需简易控制系统。

这种充电方法电解水很少，避免了蓄电池过充电。但在充电初期电流过大，对蓄电池寿命造成很大影响，且容易使蓄电池极板弯曲，造成蓄电池报废。恒压充电很少使用，只有在充电电源电压低而电流大时采用。如汽车行驶过程中，蓄电池就是以恒压充电法充电的。

4）恒压限流充电法

为了克服恒压充电法中初期电流过大，而使充电设备不能承受的缺点，常采用恒压限流充电法来代替恒压充电法。在充电第一阶段，用恒定的电流充电；在蓄电池电压达到一定电压后，维持此电压恒定不变，转为第二阶段的恒压充电过程，当充电电流下降到一定值后，继续维持恒压充电大约 1h 即可停止充电。

2. 蓄电池快速充电法

为了能够最大限度地加快蓄电池的化学反应速率，缩短蓄电池达到满充状态的时间，同时保证蓄电池正负极板的极化现象尽量地少或轻，提高蓄电池使用效率。快速充电技术近年来得到了迅速发展。

1）蓄电池快速充电的原理

由蓄电池的化学反应原理可知，蓄电池在充放电的过程中要产生氧气。在密封式铅酸蓄电池中，这些正极产生的氧气可以通过隔膜和气室被负极吸收，整个化学反应变成一个循环的反应形式，从而达到免维护的目的。但它的内压是有限的，致使阴极吸收速率也是有限的。如果充电电压过高，正极产生氧气的速率过快，吸收速率跟不上氧气的产生速率，长时间之后必然造成电池失水，从而诱发蓄电池的微短路、硫酸化等失效现象，损害蓄电池的质量和使用寿命。同时，高速率充电时蓄电池的极化会造成蓄电池内部压力上升、蓄电池温度上升、蓄电池内阻升高等，这不仅会缩短蓄电池寿命，而且有可能对蓄电池造成永久性伤害。同时也使蓄电池可接受的充电电流下降，蓄电池不可能充到标称容量。

蓄电池的这一化学反应原理是制定快速充电方法的依据。快速充电要想方设法加快蓄电池的化学反应速率(提高充电电压或电流等)，使之充电速度得到最大的提高；快速充电又要保证负极的吸收能力，使负极能够跟得上正极氧气产生的速率，同时要尽可能地消除蓄电池的极化现象。这一原理也表明，蓄电池的快速充电的速率是有上限的，不可能无限制的提高蓄电池的充电速率。

要想提高蓄电池的化学反应速率，有两种方式：一是改进蓄电池的结构以降低内阻和提高反应离子的扩散速率；二是改进蓄电池的充电方法，允许加大充电电流，缩短充电时间。

2）几种快速充电方法

(1) 脉冲式充电法。脉冲充电法首先是用脉冲电流对蓄电池充电，然后停充一段时

间，如此循环，如图 2.8 所示。充电脉冲使蓄电池充满电量，而间歇期使蓄电池经化学反应产生的氧气和氢气有时间重新化合而被吸收掉，使浓差极化和欧姆极化自然而然地得到消除，从而减轻了蓄电池的内压，使下一轮的恒流充电能够更加顺利地进行，使蓄电池可以吸收更多的电量。间歇脉冲使蓄电池有较充分的反应时间，减少了析气量，提高了蓄电池的充电电流接受率。

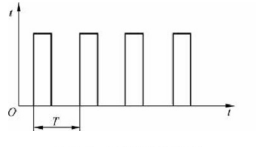


图 2.8　脉冲式充电曲线

(2) 变电流间歇充电法。变电流间歇充电法是建立在恒流充电和脉冲充电的基础上，如图 2.9 所示。其特点是将恒流充电段改为限压变电流间歇充电段。充电前期的各段采用变电流间歇充电的方法，保证加大充电电流，获得绝大部分充电量。充电后期采用定电压充电段，获得过充电量，将蓄电池恢复至完全充电态。通过间歇停充，使蓄电池经化学反应产生的氧气和氢气有时间重新化合而被吸收掉，使浓差极化和欧姆极化自然而然地得到消除，从而减轻了蓄电池的内压，使下一轮的恒流充电能够更加顺利地进行，使蓄电池可以吸收更多的电量。

(3) 变电压间歇充电法。变电压间歇充电法如图 2.10 所示。与变电流间歇充电方法不同之处在于第一阶段的不是间歇恒流，而是间歇恒压。

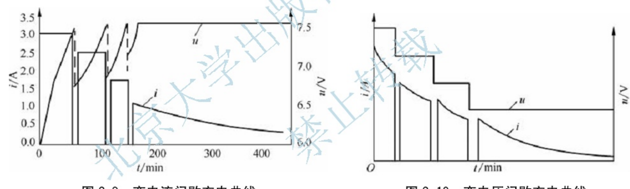


图 2.9　变电流间歇充电曲线

图 2.10　变电压间歇充电曲线

比较图 2.9 和图 2.10 可以看出，图 2.10 更加符合最佳充电的充电曲线。在每个恒电压充电阶段，充电电流自然按照指数规律下降，符合蓄电池电流可接受率随着充电的进行逐渐下降的特点。

2.2.7　铅酸蓄电池 SOC 估计

蓄电池剩余容量的多少一般用蓄电池荷电状态(SOC)来描述。蓄电池荷电状态是无量纲的量，既可以反映蓄电池剩余的电量，也可以反映蓄电池消耗的电量。蓄电池荷电状态估算是蓄电池管理系统的核心部分，也是蓄电池管理技术的难点之一。电动汽车蓄电池在使用过程中表现为高度非线性，这使得准确估算蓄电池荷电状态具有很大难度。

目前国内外蓄电池常用的荷电状态估计的方法主要有放电实验法、安时计量法、开路电压法、负载电压法、电化学阻抗频谱法、内阻法、线性模型法、神经网络法和卡尔曼滤波法等。

1. 放电实验法

放电实验法是最可靠的蓄电池 SOC 估计方法，采用恒定电流进行连续放电，放电电流与时间的乘积即为剩余电量。放电实验法在实验室中经常使用，适用于所有电池，但它也存在缺点：一是花费时间长，二是要必须中断蓄电池正在进行的工作。

放电实验法不适合行驶中的电动汽车，但可以用于电动汽车蓄电池的检修。

2. 安时计量法

安时(Ah)计量法是目前最常用的蓄电池 SOC 估计方法。假设放电(或充电)起始状态为 SOC_0，那么当前状态(t_k 时刻)的 SOC_k 表示为

$$SOC_k = SOC_0 - \int_{t_0}^{t_k} \frac{\eta I dt}{C_e} \tag{2-4}$$

式中，C_e 为蓄电池额定容量；I 为蓄电池电池电流；η 为蓄电池充放电效率。

3. 开路电压法

蓄电池的开路电压在数值上接近蓄电池电动势。铅酸蓄电池电动势是电解液密度的函数，电解液密度随电池放电成比例降低，用开路电压可估计蓄电池 SOC。开路电压法的显著缺点是需要蓄电池长时静置，以达到电压稳定，蓄电池状态从工作恢复到稳定，需要几个小时甚至十几个小时，这给测量造成困难；静置时间如何确定也是一个问题，所以该方法只适用于电动汽车驻车状态。在充电初期和末期用开路电压法估计蓄电池 SOC 效果好，一般常与安时计量法结合使用。

4. 负载电压法

蓄电池放电开始瞬间，电压迅速从开路电压状态进入负载电压状态，在蓄电池负载电流保持不变时，负载电压随蓄电池 SOC 变化的规律与开路电压随蓄电池 SOC 的变化规律相似。负载电压法的优点是能够实时估计蓄电池组的蓄电池 SOC，在恒流放电时，具有较好的效果。实际应用中，剧烈波动的蓄电池电压给负载电压法应用带来困难。解决该问题，要储存大量电压数据，建立动态负载电压和蓄电池 SOC 的数学模型。负载电压法很少应用到实际车辆上，但常用来作为蓄电池充放电截止的判据。

5. 电化学阻抗频谱法

电化学阻抗表示蓄电池电压与电流之间的传递函数，通常是一个复数变量。测量蓄电池阻抗有恒流和恒压两种模式。在恒流模式下，当电池以电流 I 放电或充电时，将频谱为 f 的正弦电流 Δi 叠加在 I 上，得到电压响应 Δv，蓄电池阻抗定义为

$$\begin{aligned} \Delta i &= I_{max}\sin(2\pi f t) \\ \Delta v &= I_{max}\sin(2\pi f t - \phi) \\ Z(f) &= \frac{V_{max}}{I_{max}} e^{j\phi} \end{aligned} \tag{2-5}$$

式中，$Z(f)$为蓄电池阻抗；I_{max}为最大电流；V_{max}为最大电压。

电化学阻抗频谱是用来估计电池 SOC 的有效工具，用实部与虚部表示电化学阻抗频谱得到乃奎斯特图；用幅值与相角表示电化学阻抗频谱得到博德图。不同的蓄电池 SOC，蓄电池的乃奎斯特图和博德图中各曲线的差异具有一定的规律性，这成为估计蓄电池 SOC

的依据。虽然在应用电化学阻抗频谱法估算蓄电池 SOC 方面做了大量的研究工作，但因这项技术目前仍存在争议，故很少应用到实际中。

6. 内阻法

蓄电池内阻有交流内阻(常称为交流阻抗)和直流内阻之分，它们都与 SOC 有密切关系。

蓄电池交流阻抗为蓄电池电压与电流之间的传递函数，是一个复数变量，表示蓄电池对交流电的反抗能力，用交流阻抗仪来测量。蓄电池交流阻抗受温度影响大，是对蓄电池处于静置后的开路状态，还是对蓄电池在充放电过程中进行交流阻抗测量，存在争议，所以很少用于实车上。

直流内阻表示蓄电池对直流电的反抗能力，等于在同一很短的时间段内，电池电压变化量与电流变化量的比值。实际测量中，将蓄电池从开路状态开始恒流充电或放电，相同时间里负载电压和开路电压的差值除以电流值就是直流内阻。铅酸蓄电池在放电后期，直流内阻明显增大，可用来估计蓄电池的 SOC。直流内阻的大小受计算时间段影响，若时间段短于 10ms 时，只有欧姆内阻能够检测到；若时间段较长，内阻将变得复杂。准确测量蓄电池单体内阻比较困难，这是直流内阻法的缺点。内阻法适用于放电后期蓄电池 SOC 的估计，可与安时计量法组合使用。

7. 线性模型法

线性模型法是基于电流、电压、SOC 变化量和上一个时间点的 SOC 值间的关系建立的线性方程，方程具体表达式为

$$\begin{aligned} \Delta \mathrm{SOC}_i &= k_0 + k_1 V_i + k_2 I_i + k_3 \mathrm{SOC}_{i-1} \\ \mathrm{SOC}_i &= \mathrm{SOC}_{i-1} + \Delta \mathrm{SOC}_i \end{aligned} \tag{2-6}$$

式中，SOC_i 为当前时刻的 SOC 值；$\Delta\mathrm{SOC}_i$ 为 SOC 的变化量；V_i、I_i 分别为当前时刻的电压与电流。$k_0 \sim k_3$ 为利用参考数据，可通过最小二乘法得到其值，无物理意义。

上述模型适用于小电流放电且蓄电池 SOC 变化缓慢的情况，对测量误差和错误的初始条件有很高的鲁棒性。

8. 神经网络法

蓄电池是高度非线性的系统，对其充放电过程很难建立准确的数学模型。神经网络具有非线性的基本特性，并具有并行结构和学习能力，对于外部激励，能给出相应的输出，所以能够模拟蓄电池的动态特性来估算蓄电池 SOC。估计电池 SOC 常采用三层典型神经网络，即输入层、中间层和输出层。输入、输出层神经元个数根据实际问题的需要来确定，一般为线性函数，常用电压、电流、累积放出电量、温度、内阻及环境温度等作为输入变量；中间层神经元个数取决于问题的复杂程度及分析精度。神经网络法适用于各种电池，缺点是需要大量的参考数据进行训练，估计误差受训练数据和训练方法的影响很大。

9. 卡尔曼滤波法

利用卡尔曼滤波方法估算蓄电池 SOC 的研究是在近几年才开始的，卡尔曼滤波的一个显著特点是用状态空间的概念来描述其数学模型。卡尔曼滤波另一个新颖特点是它的解是递归计算的，而且可不加修改地应用于平稳和非平稳环境。

2.3 镍氢电池

2.3.1 电动汽车用镍氢电池的发展动态

镍氢电池是20世纪90年代发展起来的一种新型绿色电池，具有高能量、长寿命、无污染等特点，因而成为世界各国竞相发展的高科技产品之一。相对铅酸蓄电池，镍氢电池在能量体积密度方面提高了3倍，在比功率方面提高了10倍。

2010年12月10日的Automotive News(汽车新闻)引用了一位丰田高层人士的话指出，在未来10年内丰田仍会坚持使用老一代的镍金属电池，12年的批量化生产已经证明了镍氢电池的有效性和安全性，虽然在未来镍氢电池终会被锂离子电池取代，但锂离子电池更适合插电式和纯电动汽车使用，而混合动力汽车需要电池有快速充电和放电性能，在这点上镍氢电池的优点依然明显。

目前镍氢电池用于电动汽车主要在日本、美国、德国和法国进行开发。

日本从事电动汽车用镍氢电池开发的主要代表性厂家为松下电池公司。松下成功开发了纯电动汽车用的高能型电池组和混合动力汽车用的高功率型电池组，并且将电池成本降到500美元/(kW·h)左右。丰田"普锐斯"、"雷克萨斯LS600h"等混合动力汽车均采用镍氢充电电池。

日本丰田FCHV-adv型车为燃料电池混合动力汽车，配备了燃料电池和镍氢电池，其中镍氢电池为电动机的起动及燃料电堆起动提供电能，一次充满氢的续驶里程为830km左右。

美国Ovonic公司在美国先进电池开发联合体(USABC)的资助下开展电动汽车用MH-Ni蓄电池的开发，研制水平达到了USABC制定的中期发展目标。

美国Ovonic公司生产的混合动力汽车用镍氢动力电池在世界众多汽车厂家有着广泛的使用，如丰田Prius、Camry、本田Civic、Insight、福特Fusion、Escape、雷克萨斯RX400h、保时捷Cayenne等。

Ovonic公司2011年3月份制定车用镍氢电池技术发展蓝图，提出了"Half the size, Half the cost"(体积减半，耗费减半)的口号。未来镍氢电池的研究重点集中在三个方面：储氢合金的改进；稳定高比容量正极材料$Ni(OH)_2$的制备与O_2控制；电解液的重新分配。

德国Varta公司开发的超高功率镍氢电池功率密度已达到1000W/kg，但其比能量仅为40Wh/kg。这种电池也很好地适应了42V汽车电气系统的需求，它不但放电功率高，脉冲充电功率也高达1100W/kg(单体电池水平)，而且在低温－25℃时脉冲充电功率还能达到500W/kg。

法国Saft公司的4/5SF型(Φ41mm×93mm)高功率镍氢电池容量为14A·h，比能量为47W·h/kg，80%充电态对应的比功率为900W/kg，功率密度达2500W/L。

在镍氢电池领域，我国在技术和资源上均具有优势，我国的氢氧化镍性能世界领先，稀土资源丰富，具有得天独厚的资源优势。目前，在国内镍氢电池领域，春兰集团与科力远成为主要的竞争对手。除上述两家外，包钢稀土、中炬高新及天津蓝天高科也在生产镍

氢电池，而厦门钨业、吉恩镍业则是镍氢电池材料供应商。

2007年春兰动力电池制造公司通过对所生产电池的上百次实验，掌握了电池最新封装技术，各项性能指标达到国际标准，从而为高能动力镍氢电池的轻量化、标准化、模块化和系统化，提供了高可靠性、可管理性、经济性的整体解决方案。春兰首先解决了高能动力镍氢电池的储氢技术，其次解决了散热、放电效果、稳定性等一系列技术问题。另外，春兰采用了国际一流的生产设备，并在这种电池上应用了一种达到欧盟环保要求的无毒高密度封装材料。经测试，应用最新封装技术的春兰高能动力镍氢电池，能量密度高，质量比能量最大已达84.5W·h/kg；放电性能强，其单体电池1.2V 16A·h常温下以不同倍率进行放电，放电平台稳定，在12*C*倍率下的放电平台在1V以上，3*C*放电容量可达额定容量的90%以上；循环寿命长，按国家标准GB/T 18332.2—2001进行单体电池80% DOD循环寿命测试，循环寿命大于1300次。使用过程中不需要进行维护，也无任何物质泄出，即使出现短路、跌落、加热、振动等现象也不会爆炸、燃烧。由于封装技术十分先进，因而，春兰高能动力镍氢电池比其他同类型电池质量轻、体积小、功率大、能量高，进行组合后，模块化和系统集成效果好，电源管理灵敏，可靠性、经济性十分显著。

目前，春兰研发的42V超大容量和500A以上大电流高能动力镍氢电池组及管理系统，已应用于长春、武汉、无锡、天津、聊城、株洲、上海等地的城市混合动力公交车上，已成功地进行了示范运行，并全面通过了国家发改委电动车管理动力电池强制检测标准。配置了春兰高能动力镍氢电池的电动车，还大量出口到法国、意大利、德国等节能和环保要求相当严格的欧盟国家。

湖南神舟科技股份有限公司也是一家专业从事大功率和超大功率镍氢动力电池的研究、开发、生产和销售的高科技企业。研制的高功率40A·h镍氢电池的连续充电电流可达4*C*，连续放电电流可达8*C*；在−20～45℃的温度范围内能够适应大电流连续充放电工作；单体电池1*C*充电80%SOC、2*C*放电100%DOD的循环寿命超过3100次，且在寿命期内，容量高于40A·h的循环次数达2700次，单组电池装车运行已累计超过10万km。其8A·h的镍氢电池主要与轿车配套，比能量为45W·h/kg，比功率为800W/kg，电池的循环寿命超过400次。

江苏奇能电池有限公司(中澳合资企业)采用国内外最先进的设备和一流的绿色环保技术，使用国内外高质量的原材料，专业生产镍氢高功率型电池，产品生产过程实施严格的质量管理办法进行质量控制。产品质量稳定可靠，循环使用寿命长，功率性能卓越，高低温充放电效率高，可广泛应用在混合型电动汽车、电动自行车、助动车、高尔夫车、老人代步车和电动工具等领域。奇能动力镍氢电池项目主要生产混合动力汽车电源系统，也是国家重点鼓励发展的新能源产业项目。

虽然镍氢电池在技术上取得了很大突破，但仍有不少因素制约其实际应用，包括高温性能、储存性能、循环寿命、电池组管理系统、热管理和价格等。

2.3.2 镍氢电池的分类与结构

1. 镍氢电池的分类

按照外形，镍氢电池可以分为：方形镍氢电池和圆形镍氢电池。

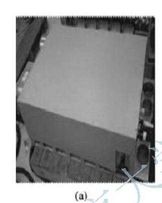
2. 镍氢电池的结构

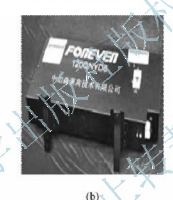
镍氢电池主要由正极、负极、极板、隔板、电解液等组成。

镍氢电池正极是活性物质氢氧化镍，负极是储氢合金，用氢氧化钾作为电解质，在正负极之间有隔膜，共同组成镍氢单体电池。在金属铂的催化作用下，完成充电和放电的可逆反应。

镍氢电池的极板有发泡体和烧结体两种，发泡体极板的镍氢电池在出厂前必须进行预充电，且放电电压不能低于 0.9V，工作电压也不太稳定，特别是在存放一段时间后，会有近 20%的电荷流失，老化现象比较严重，为避免发泡镍氢电池老化所造成的内阻增高，镍氢电池在出厂前必须进行预充电。经过改进的烧结体极板的镍氢电池，其烧结体极板本身就是活性物质，不需要进行活性处理，也不需要进行预充电，电压平衡、稳定，具有低温放电性能好、不易老化和寿命长的优点。

镍氢电池的基本单元是单体电池，按使用要求组合成不同电压和不同电荷量的镍氢电池总成。图 2.11 所示的是我国自主研发的电动汽车用镍氢电池。


(a)



(b)

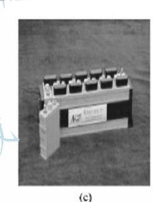

(c)

图 2.11 我国自主研发的电动汽车用镍氢电池

2.3.3 镍氢电池的特点

镍氢电池具有无污染、高比能、大功率、快速充放电、耐用性等许多优异特性。与铅酸蓄电池相比，镍氢电池除具有比能量高、质量轻、体积小、循环寿命长的特点以外，还具有以下特点。

(1) 比功率高。目前商业化的镍氢功率型电池能做到 1350W/kg。

(2) 循环次数多。目前应用在电动车上的镍氢动力电池，80%放电深度(DOD)循环可以达 1000 次以上，为铅酸蓄电池的三倍以上，100%DOD 循环寿命也在 500 次以上，在混合动力汽车中可使用五年以上。

(3) 无污染。镍氢电池不含铅、镉等对人体有害的金属，为 21 世纪“绿色环保电源”。

(4) 耐过充过放。

(5) 无记忆效应。

(6) 使用温度范围宽。正常使用温度范围－30～55℃；储存温度范围－40～70℃。

(7) 安全可靠。短路、挤压、针刺、安全阀工作能力、跌落、加热、耐振动等安全性、可靠性试验无爆炸、燃烧现象。

2.3.4 镍氢电池的工作原理

镍氢电池是将物质的化学反应产生的能量直接转化成电能的一种装置。镍氢电池由镍氢化合物正电极、储氢合金负电极以及碱性电解液(如30%的氢氧化钾溶液)组成。密封一次镍氢电池的性能特点主要取决于本身体系的电极反应。

充电时正、负极的电化学反应为

$$Ni(OH)_2 - e + OH^- \longrightarrow NiOOH + H_2O$$

$$2MH + 2e \longrightarrow 2M + H_2 \uparrow$$

放电时正、负极的电化学反应为

$$NiOOH + H_2O + e \longrightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$$

$$2M^- + H_2 \longrightarrow 2MH + 2e$$

当镍氢电池以标准电流放电时，平均工作电压为1.2V。当电池以8C率放电时，端电压降至1.1V时，则认为放电已完。电压1.1V称为8C率放电时的放电终止电压(0.6～0.8V)。

2.3.5 镍氢电池的充放电特性

镍氢电池的充放电特性可以通过对电池进行不同倍率的充放电实验获得。通常电池在一定电流下进行充电和放电时都是使用曲线来表示电池的端电压和温度随时间的变化，把这些曲线称为电池的特性曲线。

一般充放电电流的大小常用充放电倍率来表示，即

充放电倍率=充放电电流/额定容量

例如，额定容量为100A·h的电池用20A放电时，其放电倍率为0.2C。

1. 镍氢电池的充电特性

在充电起始阶段，电池端电压迅速上升，随着时间的延长，电池电压上升减缓，电池的容量与电池的端电压有一定的对应关系，如图2.12中曲线1所示。

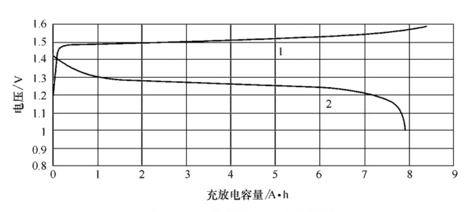


图2.12 电池常温5C充电曲线

曲线1—5C充电8.4A·h；曲线2—常温0.5C放电至1.0V

电池在高温情况下充电，虽然充电时间较长，但充电效率下降，导致放电容量减少，如图2.13所示。

在充电电流的作用下，电池的端电压迅速上升，而且充电电流越大，充电效率越低；

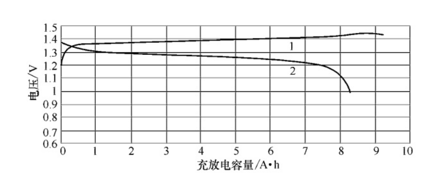


图 2.13　电池高温(45℃)充电曲线

曲线 1—高温(45℃)1*C* 充电 9.24A·h；曲线 2—常温 0.5*C* 放电至 1.0V

在充电结束后，由于电池极化作用的消失，电池端电压逐渐下降。

2. 镍氢电池的放电特性

随着放电的进行，总的趋势是随着放电时间的延续，电池的端电压不断下降。放电电流越大电池所能放出的安时量越小，电池的端电压越低，如图 2.14 所示。

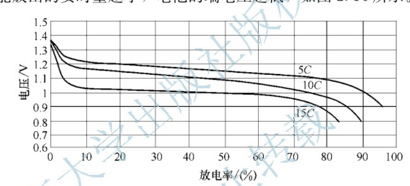


图 2.14　电池常温下不同倍率放电曲线

在相应电流下，温度随充电放电过程的变化情况，同时也可以根据充放电电流的大小和时间计算出充放电容量。

虽然常温下延长了充电时间，但在低温情况下，电池放电容量将会下降，如图 2.15 所示。

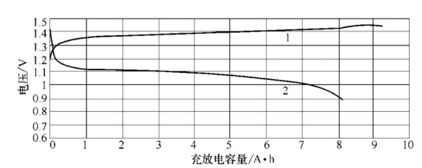


图 2.15　电池低温(－18℃)放电曲线

曲线 1—常温 0.5*C* 充电 9.24A·h；曲线 2—低温(－18℃)1*C* 放电至 0.9V

2.3.6　镍氢电池 SOC 估计

镍氢电池 SOC 估计方法很多，铅酸蓄电池 SOC 的估计方法有些也适合镍氢电池。这

里介绍的镍氢电池 SOC 估计方法的结构如图 2.16 所示。由神经网络根据电池的外特性参数对电池的 SOC 值进行预估，再用卡尔曼滤波递推算法对 SOC 进行最优估计以提高精度。由卡尔曼滤波的原理可知，要想利用卡尔曼滤波对 SOC 进行状态估计，就必须有一个 SOC 的信号模型和测量方程。有了这两个方程，就可以利用卡尔曼滤波的递推公式对 SOC 值进行最优化的滤波估计。

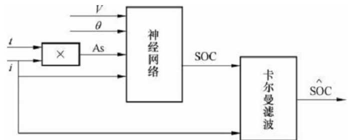


图 2.16 电池 SOC 的估计模型

1. 电池 SOC 估计的神经网络结构

采用三层径向神经网络，输入层只是传递输入信号到隐层，隐层采用高斯函数，输出层采用的是纯线性函数。确定电池端电压 V、电池温度 θ、电池放电或充电的安培秒 As 为三个输入变量，输出变量为电池的 SOC 值。这样通过网络预估得到的 SOC 为

$$\mathrm{SOC}=\sum_{j=1}^{N_h} w_j u_j(X) \tag{2-7}$$

式中，$u_j(X)=\exp\left[-\frac{(X-C_j)^{\mathrm{T}}(X-C_j)}{2\delta_j^2}\right]$，$j=1，2，3，\cdots，N_h$；

X——输入向量(V，θ，As)；

w_j——隐层节点到输出节点的权重；

C_j，δ_j——分别为高斯函数的中心值和标准化常数。

2. 卡尔曼滤波器的信号模型与输出方程的确定

由 SOC 的定义可知

$$\mathrm{SOC}=\frac{Q_{\mathrm{res}}}{Q_n} \tag{2-8}$$

$$Q_{\mathrm{res}}(i，t，\theta)=Q_n(I，\theta)-\int_0^t \eta_{\mathrm{A}}(i_{\mathrm{a}})i_{\mathrm{a}}\mathrm{d}t \tag{2-9}$$

$$\eta_{\mathrm{A}}(i_{\mathrm{a}})=\frac{Q_I}{Q_i}=\left(\frac{i_{\mathrm{a}}}{I}\right)^{n-1} \tag{2-10}$$

联立上述三个方程可得电池放电时荷电状态的信号方程为

$$\mathrm{SOC}(t)=1-Q_n^{-1}\int_0^t\left(\frac{i_{\mathrm{a}}(t)}{I}\right)^n I\,\mathrm{d}t \tag{2-11}$$

式中，n 为 Peukert 常数。

令 $\mathrm{SOC}(t)=x(t)$，在等式两边对时间 t 求导得

$$x'(t)=\frac{Q_n^{-1}i_{\mathrm{a}}^n}{I^{n-1}}，\quad x(0)=1 \tag{2-12}$$

令 $u(t)=i_{\mathrm{a}}^n(t)$，并考虑系统噪声，即由于模型的不确定性而产生的模型噪声，得系统方程为

$$x'(t)=-\frac{Q_n^{-1}u(t)}{I^{n-1}}+w(t) \tag{2-13}$$

输出方程为

$$y(t)=x(t)+v(t) \tag{2-14}$$

式中，$w(t)$为系统噪声；$v(t)$为测量噪声。

对以上两个方程进行采用零阶保持采样离散化，得

$$x(k+1)=Ax(k)+Bu(k)+w(k) \tag{2-15}$$

$$y(k)=Cx(k)+v(k) \tag{2-16}$$

式中，$A=1$；$B=\left(-\frac{1}{Q_n I^{n-1}}\right)$；$C=1$。

现假定 $w(k)$与 $v(k)$是均值为零、互不相关的高斯白噪声。

$E[w(k)]=0$；$E[v(k)]=0$；$E[w(k)]^2=\delta_w^2$；$E[v(k)]^2=\delta_v^2$；$E[w(k)v(k)]=0$。

其中，δ_w 和 δ_v 可以在实验中获得，这样就可以根据控制信号 $u(k)$和测量输出 $y(k)$估计状态变量 $x(k)$，即电池的 SOC 值。

2.4 锂离子电池

2.4.1 电动汽车用锂离子电池的发展动态

锂离子电池是 1990 年由日本索尼公司首先推向市场的新型高能蓄电池，是目前世界最新一代的充电电池。与其他蓄电池比较，锂离子电池具有电压高、比能量高、充放电寿命长、无记忆效应、无污染、快速充电、自放电率低、工作温度范围宽和安全可靠等优点，它已成为未来电动汽车较为理想的动力电源。

近年来，在各国政府的支持与推动下，锂离子电池技术迅速发展，其产业化也正在向前推进。目前，作为纯电动汽车独立驱动电源，锂离子电池的比能量还需要进一步提高；而作为混合动力汽车的辅助电源，锂离子电池在性能、寿命、安全性等方面基本符合要求。

世界上许多知名的汽车制造商都在致力于开发以采用锂离子蓄电池为电源的电动汽车，如美国福特、克莱斯勒，日本日产、丰田、三菱，法国 Courreges、Venturi，韩国现代等。三菱、福特、日产、Venturi 等多家公司都宣布其采用锂离子电池的电动汽车将于近期投放市场。

日本在研发车载化学电源方面已经走在了世界前列。

日产公司的 Altra 纯电动汽车采用新神户电机生产的高能锂离子蓄电池驱动，最高时速可达到 50km/h；日产公司的 Tino 是继丰田的 Prius、本田的 Insight 后第三种投放市场的混合动力汽车，该车采用了新神户电机开发的 3.6A·h 以 $LiMn_2O_4$ 为正极的圆柱形锂离子蓄电池；日本蓄电池公司生产的高能锂离子蓄电池用于三菱公司的 FTO 纯电动汽车上，完成了 24h 行驶里程超过 2000km 的可靠性考核。目前，日产汽车正在全球加快建立锂离子电池生产基地，力争在锂离子电池生产方面居于全球领先地位。到 2013 年，日产在全球各地生产的锂离子电池可以满足 50 万辆电动汽车的需要，除了用在日产聆风上，还可以用在雷诺或其他车型上。

日本的三大汽车厂商丰田、本田和日产在 2010 年年底至 2011 年上半年期间相继上市

了配备锂电池的混合动力汽车普锐斯α、思域和风雅。

丰田的普锐斯α尤其重视电池的小型化，因此采用了锂电池。锂电池的电池组内置了56个方形单元，如图2.17所示。一个锂电池单元的电压为3.6V，单元质量比能量为73W·h/kg，单元质量比功率为3550W/kg，单元电流容量为5A·h，电池组整体电压为201.6V。

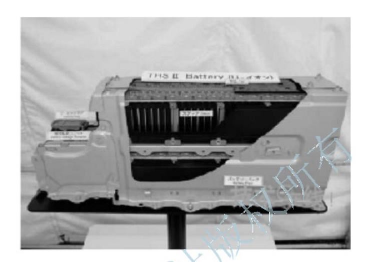


图2.17　7座款普锐斯α的锂电池组

本田的新款思域混合动力汽车上的IPU(Intelligent Power Unit)集电池、逆变器及DC-DC转换器等为一体，其尺寸与用于原思域混合动力汽车的IPU相同，如图2.18所示。新款思域混合动力车是该公司首款使用锂电池的车型，采用了重视车辆碰撞时安全性的设计。同时还考虑到万一开发时间出现延误，可立即替换为原来使用镍氢电池的IPU。

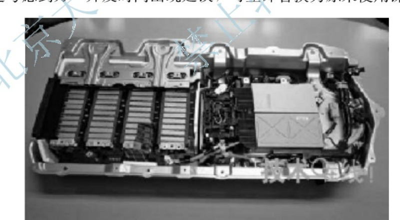


图2.18　新思域的IPU

本田在思域混合动力汽车上采用的锂电池是外壳材质使用铝合金的方形单元，正极采用$Li(Co\text{-}Ni\text{-}Mn)O_2$(钴·镍·锰酸锂)三元类材料。思域混合动力车通过串联40个单元组成电池组。一个锂电池单元的电压为3.6V，单元质量比能量为75W·h/kg，单元质量比功率为3600W/kg，单元电流容量为4.7A·h，电池组整体电压为144V。比原思域混合动力车的电池组串联132个输出电压为1.2V的镍氢电池单元获得的158.4V输出电压要低。新款思域的电力容量也由原款的908.5W·h降至676.8W·h，减少了25%左右。不过，由于单元的输出密度增加，新款车电池组的最大输出功率比原来的15kW提高了33%，达到20kW。虽然大幅削减了单元数量，但电动机输出功率由原来的15kW提高到了17kW

(能量再生时的输出功率为20kW)。另外削减单元数量在成本方面也有好处。虽然单元的成本比较高，但由于削减了单元数量，因此电池的总成本与原来相同。锂电池提高了输出功率，由于使用的单元数量较少，与其他电池组相比，还大幅实现了小型轻量化。新款电池组的质量为22kg，体积为16L，与原来的31kg、25L相比，质量减轻29%，体积缩小36%。

比本田更加重视输出功率而采用锂电池的是日产，日产电池单元的特点是，在3家公司中唯一采用了层压型，如图2.19所示。日产风雅混合动力汽车由12个模块(96个单元)组成电池组。一个锂电池单元的电压为3.6V，单元质量比能量为70W·h/kg，单元质量比功率为4000W/kg，单元电流容量为4.1A·h，电池组整体电压为346V。层压型单元采用将正极材料、隔膜和负极材料积层的构造，外装容器使用铝和树脂薄膜。而本田和丰田的单元是将较长的正极、隔膜和负极叠绕并收纳在金属容器内形成的方形单元。



图2.19 日产风雅混合动力汽车的电池组构造

层压型单元可减薄厚度，因此表面积较大，在冷却性能方面具有优势，而且可增加从正负极获取电流的电极宽度，因此适合实现电池的高输出功率。实际配备于车辆时，是先将8个单元叠放在金属容器内形成电池模块，"风雅混合动力汽车"共配备了12个这种模块。单元在模块内紧密重叠，单元的热量从端子和模块外壳散发。使用宽端子的层压型单元不仅能实现低电阻化，还有利于散热。

与镍氢电池相比，锂电池的魅力在于可实现电池的小型、轻量化。三家公司在混合动力汽车上采用的锂电池每单元的电压均为3.6V，是单元电压1.2V的镍氢电池的3倍。另外，锂电池与镍氢电池相比，正极和负极的活性物质容易以较薄的厚度涂布在极板上，由此可降低内部电阻。纯电动汽车使用的电池可利用这一特点来提高质量能源密度，作为混合动力汽车的电池也可用来提高输出密度。锂电池的单位质量输出密度为3550～4000W/kg，比原来的镍氢电池的1200W/kg提高到了约3倍以上。也就是说，仅从数值来看，输出功率相同时，电池的质量就可以减小至1/3。在输出功率相同情况下，锂电池的体积也可缩小至镍氢电池的一半以下。

以电动汽车为应用目标，锂离子蓄电池还须进一步完善性能指标、降低成本、提高安全性和使用寿命。目前锂离子蓄电池主要采用聚丙烯或聚乙烯类薄膜作为隔膜材料，但由于制造成本居高不下，隔膜材料已成为制约锂离子蓄电池成本的重要因素。据统计，在电极材料方面，目前全球90%的电动车车型使用的是日韩的电池，技术路线以锰酸锂加三元材料为主。在美国，通用电动汽车Volt选择了韩国LG北美子公司的锰系动力电池。韩国LG化学或SK能源的锂电池均采用了锰系材料。同时，由于磷酸铁锂安全性和循环性都非常好，现在各国都在重点技术攻关。

从电动汽车电池的发展历程看，政府的参与尤为重要。在美国、日本、法国等汽车制造大国，政府所实施的专项计划都在大力推动锂离子蓄电池的发展，如美国的Feedom-CAR、日本的新阳光计划等都包括对锂离子蓄电池技术的支持，SAFT、JSB、新神户电

机等主要国外电池厂商都得到了资助。

要将锂离子电池大量应用于电动汽车仍然存在问题，主要是因为多种性能的限制，包括锂离子电池的安全性、循环寿命、成本、工作温度和材料供应。锂离子电池目前以小容量、低功率电池为主，大容量高功率的锂离子电池尚未大规模生产，因此针对电池组的电池管理系统中一些不成熟的技术(如均衡充电技术)是锂离子电池尚未在电动汽车中广泛应用的重要原因之一。

锂离子电池技术的先进性和在新兴关键市场(电动汽车领域)的应用，已激发全球范围内的研发热潮，因此锂离子电池势必将在电动汽车和新能源领域占据重要位置。目前在电动汽车中，应用较多的锂离子电池是磷酸铁锂电池，它具有磷氧共价键结构，使氧原子不会被释放出来，因而热稳定性和安全性较好，同时价格相对便宜。这些因素使磷酸铁锂电池成为小型电动汽车和并联式混合动力汽车动力电池的首选。然而在锂离子电池中，磷酸锂电池的比能量、比功率以及运行电压相对较低，在大型纯电动汽车应用方面钴酸锂和锰酸锂电池等更具优势。

目前，中国已成为全球最大的锂离子电池制造基地之一，比亚迪、中航锂电、万向集团、力神、比克、ATL 已发展成为全球锂电池行业引人注目的重点企业。我国锂离子电池的生产厂家集中在广州、天津、山东、江苏、浙江等地，华南地区(广东、福建)的锂电池生产量占国内市场份额的 65%，天津、山东、江苏、浙江占 25%其他省占 10%。华南地区锂电池生产最具代表性的为深圳，盘踞了比亚迪、比克、邦凯、华粤宝等众多知名企业，形成了产业集群。

锂离子电池的主要原材料为锂，我国的锂矿资源丰富，已探明的锂总储量居世界第二；锂离子也存在于海水中，未来可利用太阳能从海水中提取。此外，锂离子电池具有循环使用的潜力，可解决对原材料的需求问题。最终锂离子电池的价格在大规模商业化之后会下降。实际上，国内外越来越多的汽车厂家选择锂离子电池作为电动汽车的动力电池，锂离子电池技术方面的研究也在不断地取得突破。我国的电动汽车科技发展“十二五”专项规划中指出将推动以锂离子动力电池为重点的车用动力电池产业发展，使之具有国际竞争能力。对于锂离子电池技术最大的挑战是继续扩大电池容量，同时保证安全性和循环次数不受影响，并降低成本。

由此可见，锂离子电池的发展前景将受到高度关注，它必将推动电动汽车的发展。

2.4.2 锂离子电池的分类与结构

1. 锂离子电池的分类

按照锂离子电池外形形状，可以分为：

(1) 方形锂离子电池；

(2) 圆柱形锂离子电池。

按照锂离子电池正极的材料不同，汽车用锂离子电池主要分为：

(1) 锰酸锂离子电池；

(2) 磷酸铁锂离子电池；

(3) 镍钴锂离子电池或镍钴锰锂离子电池。

第一代车用锂离子电池是锰酸锂离子电池。用于锂离子电池正极材料的锰酸锂

($LiMn_2O_4$)具有尖晶石结构，其理论容量为148mA·h/g，实际容量为90～120mA·h/g，工作电压范围为3～4V。该正极材料的主要优点为：锰资源丰富、价格便宜、安全性高、比较容易制备。缺点是理论容量不高；材料在电解质中会缓慢溶解，即与电解质的相容性不太好；在深度充放电的过程中，材料容易发生晶格畸变，造成电池容量迅速衰减，特别是在较高温度下使用时更是如此。为了克服以上缺点，近年新发展起来了一种层状结构的三价锰氧化物$LiMnO_2$。试验表明，用$LiMnO_2$作正极材料的锂离子电池的理论容量和实际容量都得到了提高，而且有效地解决了上述部分问题，但$LiMnO_2$也存在较高工作温度下的溶解问题。解决的办法是对$LiMnO_2$进行掺杂和表面修饰，目前已经取得可喜进展。

第二代是具有美国专利的磷酸铁锂离子电池。磷酸铁锂电池是指用磷酸铁锂作为正极材料的锂离子电池。磷酸铁锂电池是用来做锂离子二次电池的，现在主要方向是动力电池。磷酸铁锂($LiFePO_4$)具有橄榄石晶体结构，是近年来研究的热门锂离子电池正极材料之一。其理论容量为170mA·h/g，在没有掺杂改性时其实际容量已高达110mA·h/g。通过对磷酸铁锂进行表面修饰，其实际容量可高达165mA·h/g，已经非常接近理论容量，工作电压范围为3.4V左右。磷酸铁锂稳定性高、更安全可靠、更环保并且价格低廉。磷酸铁锂的出现是锂离子电池材料的一项重大突破，现已成为各国竞相研究的热点，目前磷酸正极材料被认为是最有发展前途的动力电池正极材料。$LiFePO_4$材料的缺点是电阻率较大，电极材料利用率低。因此研究工作主要集中在解决其电导率问题上。目前广泛采用的是包覆碳及加碳制成复合材料来提高其电导率。

磷酸铁锂电池的优点如下。

(1) 超长寿命。磷酸铁锂动力电池的循环寿命达到2000次以上，标准充电(5小时率)使用，可达到2000次。

(2) 使用安全。磷酸铁锂完全解决了钴酸锂和锰酸锂的安全隐患问题，钴酸锂和锰酸锂在强烈的碰撞下会产生爆炸对消费者的生命安全构成威胁，而磷酸铁锂已经过严格的安全测试，即使在最恶劣的交通事故中也不会产生爆炸。

(3) 可大电流快速放电。可大电流2*C*快速充放电，在专用充电器下，1.5*C*充电40min内即可使电池充满，起动电流可达2*C*，而铅酸蓄电池现在无此性能。

(4) 耐高温。磷酸铁锂电热峰值可达350～500℃，而锰酸锂和钴酸锂只在200℃左右；工作温度范围宽广(−20～75℃)，有耐高温特性。

(5) 无记忆效应。可充电池经常在充满不放完的条件下工作，容量会迅速低于额定容量值，这种现象叫做记忆效应。像镍氢、镍镉电池存在记忆性，而磷酸铁锂电池无此现象，电池无论处于什么状态，可随充随用，无须先放完再充电。

(6) 体积小、质量轻。同等规格容量的磷酸铁锂电池的体积是铅酸蓄电池体积的2/3，质量是铅酸蓄电池的1/3。

(7) 绿色环保。磷酸铁锂电池不含任何重金属与稀有金属(镍氢电池需稀有金属)，无毒(SGS认证通过)，无污染，是绝对的绿色环保电池。

磷酸铁锂电池也有缺点，例如磷酸铁锂正极材料的振实密度较小，等容量的磷酸铁锂电池的体积要大于钴酸锂等锂离子电池，因此在微型电池方面不具有优势。

为了避开磷酸铁锂离子电池的专利纠纷，一些国家开发了镍钴锂离子电池或镍钴锰锂离子电池。由于钴价格昂贵，所以成本较高，安全性比磷酸铁锂离子电池稍差，循环寿命优于锰酸锂离子电池。

2. 锂离子电池的结构

锂离子电池由正极、负极、隔板、电解液和安全阀等组成。圆柱形锂离子电池结构如图 2.20 所示。

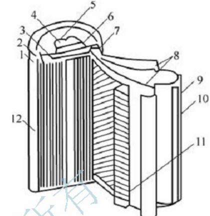


图 2.20 圆柱形锂离子电池结构示意图

1—绝缘体；2—垫圈；3—PTC 元件；4—正极端子；5—排气孔；6—防爆阀；7—正极引线；8—隔板；9—负极；10—负极引线；11—正极；12—外壳

1）正极

正极物质在锰酸锂离子电池中以锰酸锂为主要原料，在磷酸铁锂离子电池中以磷酸铁锂为主要原料，在镍钴锂离子电池中以镍钴锂为主要材料，在镍钴锰锂离子电池中以镍钴锰锂为主要材料。在正极活性物质中再加入导电剂、树脂黏合剂，并涂覆在铝基体上，呈细薄层分布。

2）负极

负极活性物质是由碳材料与黏合剂的混合物再加上有机溶剂调和制成糊状，并涂覆在铜基上，呈薄层状分布。

3）隔板

隔板的功能是关闭或阻断通道的作用，一般使用聚乙烯或聚丙烯材料的微多孔膜。所谓关闭或阻断功能是电池出现异常温度上升，阻塞或阻断作为离子通道的细孔，使蓄电池停止充放电反应。隔板可以有效防止因外部短路等引起的过大电流而使电池产生异常发热现象。这种现象即使产生一次，电池就不能正常使用。

4）电解液

电解液是以混合溶剂为主体的有机电解液。为了使主要电解质成分的锂盐溶解，必须具有高电容率，并且具有与锂离子相容性好的溶剂，即不阻碍离子移动的低黏度的有机溶液为宜，而且在锂离子蓄电池的工作温度范围内，必须呈液体状态，凝固点低，沸点高。电解液对于活性物质具有化学稳定性，必须良好适应充放电反应过程中发生的剧烈的氧化还原反应。又由于使用单一溶剂很难满足上述严酷条件，因此电解液一般混合不同性质的几种溶剂使用。

5）安全阀

为了保证锂离子电池的使用安全性，一般通过对外部电路的控制或者在蓄电池内部设有异常电流切断的安全装置。即使这样，在使用过程中也有可能其他原因引起蓄电池内压异常上升，这样，安全阀释放气体，以防止蓄电池破裂。安全阀实际上是一次性非修复式的破裂膜，一旦进入工作状态，保护蓄电池使其停止工作，因此是蓄电池的最后保护手段。

2.4.3 锂离子电池的特点

锂离子电池有许多显著特点，它的优点主要表现为：

(1) 工作电压高。锂离子电池工作电压为 3.6V，是镍氢和镍镉电池工作电压的 3 倍。

(2) 比能量高。锂离子电池比能量已达到 150W·h/kg，是镍镉电池的 3 倍，镍氢电



池的1.5倍。

(3) 循环寿命长。目前锂离子电池循环寿命已达到1000次以上，在低放电深度下可达几万次，超过了其他几种二次电池。

(4) 自放电率低。锂离子电池月自放电率仅为6%～8%，远低于镍镉电池(25%～30%)和镍氢电池(15%～20%)。

(5) 无记忆性。可以根据要求随时充电，而不会降低电池性能。

(6) 对环境无污染。锂离子电池中不存在有害物质，是名副其实的“绿色电池”。

(7) 能够制造成任意形状。

锂离子电池也有一些不足，主要表现在以下几个方面：

(1) 成本高。主要是正极材料 $LiCoO_2$ 的价格高，但按单位瓦时的价格来计算，已经低于镍氢电池，与镍镉电池持平，但高于铅酸蓄电池。

(2) 必须有特殊的保护电路，以防止过充。

2.4.4 锂离子电池的工作原理

锂离子电池正极材料采用锂化合物 $LiCoO_2$、$LiNiO_2$ 或 $LiMn_2O_4$，负极采用锂-碳层间化合物 Li_xC_6，电解液为有机溶液。典型的电池体系为

$$(-)C|LiPF_6——EC+DEC|LiCoO_2(+)$$

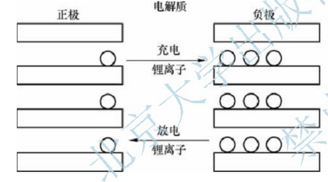


图2.21 锂离子电池工作原理图

图2.21所示为锂离子电池的工作原理，电池在充电时，锂离子从正极材料的晶格中脱出，通过电解质溶液和隔膜，嵌入到负极中；放电时，锂离子从负极脱出，通过电解质溶液和隔膜，嵌入到正极材料晶格中。在整个充放电过程中，锂离子往返于正负极之间。

以 $LiCoO_2$ 为正极材料，石墨为负极材料的锂离子电池，正、负极的电化学反应为

$$LiCoO_2 \longrightarrow Li_{1-x}CoO_2 + xLi^+ + xe^-$$

$$6C + xLi^+ + xe^- \longrightarrow Li_xC_6$$

总反应为

$$LiCoO_2 + 6C \longrightarrow Li_{1-x}CoO_2 + Li_xC_6$$

由于锂离子电池只涉及锂离子而不涉及金属锂的充放电过程，从根本上解决了由于锂枝晶的产生而带来的电池循环性和安全性的问题。

2.4.5 锂离子电池的充放电特性

在电压方面，锂离子电池对充电终止电压的精度要求很高，一般误差不能超过额定值的1%。终止电压过高，会影响锂离子电池的寿命，甚至造成过充电现象，对电池造成永久性的损坏；终止电压过低，又会使充电不完全，电池的可使用时间变短。

充电电流方面，锂电池的充电率(充电电流)应根据电池生产厂的建议选用。虽然某些电池充电率可达2*C*，但常用的充电率为0.5～1*C*。在采用大电流对锂离子电池充电时，因

充电过程中电池内部的电化学反应会产生热，因此有一定的能量损失，同时必须检测电池的温度以防过热损坏电池或产生爆炸。此外对锂电池充电，若全部用恒定电流充电，虽然可以在一定程度上缩短充电时间，但很难保证电池充满，如果对充电结束控制不当还会造成过充现象。

放电方面，锂离子电池的最大放电电流一般被限制在 2～3*C* 左右。更大的放电电流会使电池发热严重，对电池的组成物质造成损坏，影响电池的使用寿命。同时，由于大电流放电时，电池的部分能量转变成热能，因此电池的放电容量将会降低。在造成过放电(低于 3.0V)时，还会造成电池的失效。对于过放电的锂离子电池，在充电前需要进行预处理，即使用小电流充电，使电池内部被过放电的单元被激活。在电池电压被充电到 3.0V 后再按正常方式充电，通常将这一阶段的充电称为预充电。

锂电池的充电温度一般应该被限制在 0～60℃范围。电池温度过高会损坏电池并可能引起爆炸；温度过低虽不会造成安全方面的问题，但很难将电池充满。由于充电过程中，电池内部将有一部分热能产生，因此在大电流充电时，需要对电池进行温度检测，并且在超过设定充电温度时停止充电以保证安全。

2.4.6 锂离子电池的充电方法

锂离子电池可以采用不同的充电方法，其中最简单的充电方法是恒压充电。采用恒压充电时，电池电压保持不变，而充电电流将逐渐降低。当充电电流降到低于 0.1*C* 时，就认为电池被充分充电了。为了防止有缺陷的电池无休止地进行充电，采用一个备用定时器来终止充电周期。恒压充电是一个相对节省成本的方法，但是这种方法却需要很长的电池充电时间。由于在电池充电期间充电电压保持恒定，充电电流降低的很快，因而充电速率也降低的很快。这样，电池就只是在比其能够接受的低得多的电流强度下进行充电。

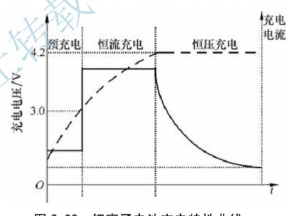


图 2.22 锂离子电池充电特性曲线

兼顾充电过程的安全性、快速性和电池使用的高效性，锂离子电池通常都采用恒流恒压充电方法，其充电过程可分为预充电、恒流充电、恒压充电三个阶段，如图 2.22 所示。

1. 预充电阶段

在该状态下，首先检测单节锂离子电池电压是否较低(＜3.0V)，如果是则采用涓流充电，即一个比较小的恒定电流对电池进行充电直至电池电压上升到一个安全值。否则可省略该阶段，这也是最普遍的情况。因为预充电主要是完成对过放电的锂电池进行修复。

2. 恒流充电阶段

涓流充电后，充电器转入恒流充电状态。该状态下，充电电流保持不变的较大的值，电池的最大充电电流决定于电池的容量。

在恒流充电和预充电状态下，通过连续监控电池的电压和温度，可以采用以下两种恒流充电终止法，终止恒流充电：

(1) 电池最高电压终止法。当单节锂电池电压达到 4.2V，恒流充电状态应立即终止；

(2) 电池最高温度终止法。在恒流充电过程中，当电池的温度达到60℃时，恒流充电状态应立即终止。

3. 恒压充电阶段

恒流充电结束后，则转入恒压充电状态。在该状态下，充电电压保持恒定。因为锂离子电池对充电电压精度的要求比较高，单节电池恒压充电电压应在规定值的±1%之间变化，因此要严格控制锂离子电池的充电电压。在恒压充电过程中，充电器连续监控电池的电压、温度、充电电流和充电时间。

常用的恒压充电终止方法有以下四种方法：

(1) 电池最高电压。当单节锂离子电池的电压达到4.25V时，恒压充电状态自动终止。

(2) 电池最高温度。当锂离子电池的最高温度达到60℃时，恒压充电状态自动终止。

(3) 最长充电时间。为了确保锂离子电池安全充电，除了设定最高电压和最高温度外，还应设置最长恒压充电时间，在温度和电压检测失败的情况下，可以保证锂电池安全充电。

(4) 最小充电电流。在恒压充电过程中，锂离子电池的充电电流逐渐减小，当充电电流下降到一定数值(通常为恒流充电电流的1/10)时，恒压充电状态自动终止。

此外，电池充足电后，若电池仍插在充电器上，电池会由于自放电而损失电量。充电器应以非常小的电流对电池充电或是监测电池电位以备对电池再充电，这种状态称为维护充电状态。

铅酸蓄电池、镍氢电池和锂离子电池的技术性能见表2-2。

表2-2 三种动力蓄电池的技术性能

技术性能	铅酸蓄电池	镍氢电池	锂离子电池
工作电压/V	2	1.2	3.6
比能量/(W·h/kg)	40	65	105～140
比功率/(W/kg)	150～200	160～230	250～400
充放电寿命/次	500～700	600～1200	800～1200
自放电率/(%)(每月)	3	30～35	6～9
有无记忆效应	有	有	无
有无污染	有	无	无

2.5 燃料电池

2.5.1 电动汽车用燃料电池的发展动态

燃料电池(Fuel Cell，FC)是一种化学电池，它直接把物质发生化学反应时释出的能量变换为电能，工作时需要连续地向其供给活物质(起反应的物质)——燃料和氧化剂。由于

它是把燃料通过化学反应释出的能量变为电能输出，所以被称为燃料电池。

燃料电池能量密度极高，接近于汽油和柴油的能量密度，几乎是零污染，号称“终极电池”，代表着电动汽车未来的发展方向，也是各国重点研发的领域之一。但是其成本太高，目前高成本瓶颈表现在：第一，燃料电池反应中需要使用贵金属铂作为催化剂，使得成本居高不下；第二，在后续使用上，储存和运输氢成本高昂，氢的储存条件很严格，一般主要有高压气态、低温液态两种储存方法，但这两种方法的单位能量所占体积都非常大，且设备昂贵；第三，加氢站等配套设施不够完善，如何提高加氢站安全性也需高额的前期投入。因此，燃料电池目前离产业化还有较长的距离要走，预计在2025年以后才会商业化。

各国政府在对研发燃料电池技术上也存在分歧，在支持力度上也各不相同。在日本，日本经济产业省前几年就对燃料电池汽车开发与推广制定了时间表，其战略目标是：2010年，日本使用的燃料电池汽车达到5万辆；2020年达到500万辆；到2030年，要全面普及燃料电池汽车。

丰田汽车曾宣布与美国萨凡纳河国家实验室(SRNL)以及可再生能源实验室(NREL)共同实施燃料电池混合动力汽车“High lander FCHV-adv”的公路实验。实验结果表明，该车的续航距离可达到693km。丰田 Mark X Zio 氢燃料电池车，预计上市时间为2014年，充满燃料可行驶780km，它的最高时速可达160km/h。燃料电池汽车的普及需要满足以下五大要素：①燃料电池车的成本；②车内空间的确保；③燃料的价格；④氢气站的普及；⑤竞争技术未能进步。

美国通用汽车公司在美国能源部的资助下，推出了以质子交换膜燃料电池(PEMFC)和蓄电池并用来提供动力的轿车。美国福特汽车公司现已研制出从汽油中提取氢的新型燃料电池，其燃料效率比内燃机提高1倍，而产生的污染则只有内燃机的5%。福特汽车公司的21世纪绿色汽车的开发计划中，氢燃料电池汽车(FCEV)作为开发研究重点。目前，福特公司与 Mobile 石油公司一起开发更具实际意义的车载汽油改质 FCEV。

在欧洲，欧盟2008年夏天决定斥资10亿欧元用于燃料电池和氢能源的研究和发展。欧盟此举旨在把燃料电池和氢能源技术发展成为能源领域的一项战略高新技术，使欧盟在燃料电池和氢能源技术方面处于世界领先地位，欧盟将力争在2020年前建立一个燃料电池和氢能源的庞大市场。

由于汽车是移动式交通工具，因此要求车用燃料电池具有较高的能量密度以及作为车辆所必需的快速起动和动力响应的能力，同时，具有成本低、安全性好、寿命长等特点。从能量密度、操作温度、耐二氧化碳能力以及耐振动冲击能力等来看，质子交换膜燃料电池(PEMFC)最适合用作混合电动汽车的动力电源，它与电动机结合后，成为一种新概念的动力机，是内燃机强有力的竞争者。但是，燃料电池成本太高，燃料电池目前离产业化还有较长的距离要走。

燃料电池正、负极之间是携带有充电电荷的固态或液态电解质，在电极上的催化剂如白金用来加速电化学反应。按照电解质及电极材料的不同，燃料电池可分为碱性、磷酸、熔融碳酸盐、固体氧化物及质子交换膜燃料电池(PEMFC)。目前得到应用的是质子交换膜燃料电池。相对于其他几种燃料电池，PEMFC 有以下优点：功率密度高、工作温度低、电解液为固态、对二氧化碳不敏感。所以 PEMFC 为目前最有前途的一种燃料电池。

燃料电池将成为未来的最佳车用能源，这一观点已被认同。虽然燃料电池可以采用多

种燃料，甚至是内燃机用的所有燃料，但是真正起电化学反应的，仅仅是其中的氢和氧化剂中的氧，因此，氢燃料电池在氢燃料制取、储存及携带等方面，以及非氢燃料电池的重整系统的效率、体积、质量大小及反应速度等方面的技术还需进一步提高。

目前，车用燃料电池急需解决以下关键问题：

(1) 提高车用燃料电池单位质量(或体积)、电流密度及功率，提高车辆所必需的快速启动和动力响应的能力。

(2) 必须开发质量轻、体积更小、能储存更多氢能的车载氢储存器，以便更有效地利用燃料能量，提高续驶里程和载重量。

(3) 必须解决好氢气的安全问题，在一定的条件下，氢气比汽油具有更大的危险性，所以无论采用什么储存方式，储存器及其安全措施都必须满足使用要求。

(4) 电池组件必须采用积木化设计，开发有效的制造工艺，并进行高效的自动化生产，从而降低材料和制造费用。

(5) 发展结构紧凑及性能可靠的质子交换膜燃料电池的同时开发应用其他燃料，像甲烷、柴油等驱动的质子交换膜燃料电池，这将会拓宽质子交换膜燃料电池的应用范围。

表 2-3 为六种燃料电池的主要特征参数。

表 2-3 六种燃料电池的主要特征参数

特征 \ 类型	质子交换膜燃料电池	碱性燃料电池	磷酸燃料电池	熔融碳酸盐燃料电池	固体氧化物燃料电池	直接甲醇燃料电池
燃料	H_2	H_2	H_2	CO、H_2	CO、H_2	CH_3OH
电解质	固态高分子膜	碱溶液	液态磷酸	熔融碳酸锂	固体二氧化锆	固态高分子膜
工作温度/℃	≈80	60～120	170～210	60～650	≈1000	≈80
氧化剂	空气或氧	纯氧	空气	空气	空气	空气或氧
电极材料	C	C	C	Ni-M	Ni-YSZ	C
催化剂	Pt	Pt、Ni	Pt	Ni	Ni	Pt
腐蚀性	中	中	强	强	无	中
寿命/h	100000	10000	15000	13000	7000	100000
特征	比功率高，运行灵活，无腐蚀	高效率，对 CO_2 敏感，有腐蚀	效率较低，有腐蚀	效率高，控制复杂，有腐蚀	效率高，运行温度高，有腐蚀	比功率高，运行灵活，无腐蚀
效率/(%)	>60	60～70	40～50	>60	>60	>60
起动时间	几分钟	几分钟	2～4h	>10h	>10h	几分钟
主要应用领域	航天、军事、汽车、固定式用途	航天、军事	大客车、中小电厂、固定式用途	大型电厂	大型电厂、热站、固定式用途	航天、军事、汽车、固定式用途

2.5.2 燃料电池的分类

1. 按燃料电池的运行机理分类

根据燃料电池的运行机理的不同，可分为以下两类。
(1) 酸性燃料电池；
(2) 碱性燃料电池。

2. 按电解质分类

根据燃料电池中使用电解质种类的不同，可分为以下9类。
(1) 质子交换膜燃料电池(PEMFC)；
(2) 碱性燃料电池(AFC)；
(3) 磷酸燃料电池(PAFC)；
(4) 熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)；
(5) 固体氧化物燃料电池(SOFC)；
(6) 直接甲醇燃料电池(DMFC)；
(7) 再生型燃料电池(RFC)；
(8) 锌空燃料电池(ZAFC)；
(9) 质子陶瓷燃料电池(PCFC)。

3. 按燃料使用类型分类

根据燃料电池的燃料使用类型不同，可分为以下3类。
(1) 直接型燃料电池；
(2) 间接型燃料电池；
(3) 再生型燃料电池。

4. 按燃料种类分类

根据燃料电池使用燃料的种类，可分为以下3类。
(1) 氢燃料电池；
(2) 甲醇燃料电池；
(3) 乙醇燃料电池等。

5. 按工作温度分类

根据燃料电池工作温度的不同，可分为以下4类。
(1) 低温型(温度低于200℃)；
(2) 中温型(温度为200～750℃)；
(3) 高温型(温度为750～1000℃)；
(4) 超高温型(温度高于1000℃)。

6. 按燃料状态分类

根据燃料电池的燃料状态不同，可分为以下两类。
(1) 液体型燃料电池；

(2) 气体型燃料电池。

2.5.3 燃料电池的特点

1. 燃料电池的优点

燃料电池与蓄电池相比，具有以下优点。

(1) 节能、转换效率高。燃料电池在额定功率下的效率可以达到60%，而在部分功率输出条件下运转效率可以达到70%，在过载功率输出条件下运转效率可以达到50%～55%。高效率随功率变化的范围很宽，在低功率下运转效率高，特别适合于汽车动力性能的要求。

燃料电池短时间的过载能力，可以达到额定功率的200%，非常适合汽车在加速和爬坡时动力性能的特征。

(2) 排放基本达到零污染。用碳氢化合物作为燃料的燃料电池主要生成物质为水、二氧化碳和一氧化碳等，属于“超低污染”，氢氧燃料电池的反应产物只有清洁的水。

(3) 无振动和噪声，寿命长。这主要与它的工作过程有关，它是通过燃料和氧化剂分别在两个电极上发生反应，由电解液和外电路构成回路，将反应中的化学能直接转化为电能。所以在整个工作过程中，没有噪声和机械振动的产生，从而减少机械器件的磨损，延长了使用寿命。

(4) 结构简单、运行平稳。燃料电池的能量转换是在静态下完成的，结构比较简单。构件的加工精度要求低。特别是质子交换膜燃料电池能量转换效率高，能够在−80℃的低温条件下起动和运转，对结构件的耐热性能要求也不高。由于无机械振动，所以运行时比较平稳。

2. 燃料电池的缺点

燃料电池有以下缺点：

(1) 燃料种类单一。目前，不论是液态氢、气态氢，还是碳水化合物经过重整后转换的氢，它们均是燃料电池的唯一燃料。氢气的产生、储存、保管、运输和灌装或重整，都比较复杂，对安全性要求很高。

(2) 要求高质量的密封。燃料电池的单体电池所能产生的电压约为1V，不同种类的燃料电池的单体电池所能产生的电压略有不同。通常将多个单体电池按使用电压和电流的要求组合成为燃料电池发动机组，在组合时，单体电池间的电极连接时，必须要有严格的密封，因为密封不良的燃料电池，氢气会泄漏到燃料电池的外面，降低了氢的利用率并严重影响燃料电池发动机的效率，还会引起氢气燃烧事故。由于要求严格的密封，使得燃料电池发动机的制造工艺很复杂，并给使用和维护带来很多困难。

(3) 价格高。制造成本高，电池价格昂贵。

(4) 需要配备辅助电池系统。燃料电池可以持续发电，但不能充电和回收燃料电池汽车再生制动的反馈能量。通常在燃料电池汽车上还要增加辅助电池，来储存燃料电池富裕的电能和在燃料电池汽车减速时接受再生制动时的能量。

2.5.4 燃料电池系统

燃料电池实际上不是“电池”，而是一个大的发电系统。对于质子交换膜燃料电池，



需要有燃料供应系统、氧化剂系统、发电系统、水处理系统、热管理系统、电力系统以及控制系统等。

1. 燃料供应系统

燃料供应系统是给燃料电池提供燃料，如氢气、天然气、甲醇等。这个系统直接采用氢气比较简单，如果用石化燃料制取氢气则相当复杂。

2. 氧化剂系统

氧化剂系统主要是给燃料电池提供氧气。氧气的来源有从空气中获取氧气或从氧气罐中获取氧气，空气需要用压缩机来提高压力，以增加燃料电池反应的速度。在燃料电池系统中，配套压缩机的性能有特定的要求，压缩机质量和体积会增加燃料电池发动机系统的质量、体积和成本，压缩机所消耗的功率会使燃料电池的效率降低。空气供应系统的各种阀、压力表、流量表等的接头要采取防泄漏措施。在空气供应系统中还要对空气进行加湿处理，保证空气有一定的湿度。

3. 发电系统

发电系统是指燃料电池本身，它将燃料和氧化剂中的化学能直接变成电能，而不需要经过燃烧的过程，它是一个电化学装置。

4. 水管理系统

由于质子交换膜燃料电池中质子是以水合离子状态进行传导，所以燃料电池需要有水，水少会影响电解质膜的质子传导特性，从而影响电池的性能。由于在电池的阴极生成水，所以需要不断及时地将这些水带走，否则会将电极“淹死”，也会造成燃料电池失效。水的管理在燃料电池中至关重要。

5. 热管理系统

大功率燃料电池发电的同时，由于电池内阻的存在，不可避免地会产生热量，通常产生的热与其发电量相当。而燃料电池的工作温度是有一定限制的，如对 PEMFC 而言，应控制在 80℃，因此需要及时将电池生成热带走，否则会发生过热，烧坏电解质膜。水和空气通常是常用的传热介质。

6. 电力系统

电力系统是将燃料电池产生的直流电转换为适合用户使用的电。燃料电池所产生的是直流电，需要经过 DC/DC 转换器进行调压，在采用交流电动机的驱动系统中，还需要用逆变器将直流电转换为三相交流电。

7. 控制系统

燃料电池控制系统主要包括电池系统的启动与停工；维持电池系统稳定运行的各操作参数的控制；对电池运行状态进行监测、判断等。

8. 安全系统

氢是燃料电池的主要燃料，氢的安全十分重要，由氢气探测器、数据处理系统以及灭火设备等构成氢的安全系统。

氢的存储与输送是燃料电池应用的关键技术之一。目前有两种方式，储氢和重整制氢。

(1) 储氢。目前使用比较广泛的储氢技术有高压储氢、液态储氢和储氢材料储氢。这3种技术在实际运用中的效果很大程度上受到材料性能的制约。储氢材料储氢技术更有优势，尤其是使用碳纳米管储氢时，效果更理想。表2-4为几种储氢技术的比较。

表2-4　几种储氢技术的比较

项　　目		高压储氢	液态储氢	储氢材料储氢	
				Ti系储氢合金	碳纳米管
安全性		低	低	较高	
能源综合利用率		低	较低	高	
储氢能力	单位质量储氢量/(%)	—	—	2	4
	单位体积储氢量/(kg/m³)	31.5	71	61	160
能量密度	单位质量能量密度/(kW·h/kg)	—	—	0.79	5.53
	单位体积能量密度/(kW·h/L)	1.24	2.8	2.4	6.32
优点		简单、方便	储运效率高、装置质量轻、体积小、储氢压力低	安全性好、运输方便、操作比较容易	
缺点		空间有限，必须使用耐高压容器，储氢压力过大，安全性降低，充氢操作复杂，成本增加	氢气液化须耗费大量能源，必须使用耐超低温的特殊容器，使用中存在危险，充氢系统复杂	成本相对较高，受制于材料的储氢性能、储氢器的结构以及储氢系统的整体设计	
应用		多	少	少	

随着材料科学的发展，储氢技术的发展主要集中开发密度更小、强度更高的材料，以提高储氢罐内的压力；开发绝热性能更好的材料，以减少液氢的蒸发，提高使用时的安全性；开发高容量的储氢材料，特别是碳纳米管等的制造技术。

(2) 重整制氢。燃料电池使用的燃料——氢气可以由重整器提供。重整器使用的原料可以是天然气、汽油、柴油等各种烃类以及甲醇、酒精等各种醇类燃料。目前使用的重整技术主要有蒸汽重整、部分氧化和催化部分氧化重整、自动供热重整以及等离子体重整等。不同的重整技术在结构、效率和对燃料的适应性等方面有不同的特点，并在不同的使用条件下发挥出它们各自的优势。蒸汽重整是目前使用最广泛的制氢方式。

① 蒸汽重整。蒸汽重整是一个化学过程，其中，氢通过碳氢化合物燃料和高温水蒸气之间的化学反应生成。蒸汽重整器的发展经历了常规型、热交换型和平板型3个过程。常规型蒸汽重整器的容量较大，目前已实现商业化，但工作条件高(850℃，1.5～2.5MPa)，制造成本较高，容量大，启动时间长，如果生产出来的氢气不能及时使用，储存也有困难。热交换型重整器外形尺寸大大减小，工作条件降低(700℃，0.3MPa)，制造成本下降，且随负荷变化性能较好，目前已成功应用于燃料电池系统中。近年来出现的平板型结构更加紧凑，成本进一步降低，但目前技术还不成熟。如果在扩大催化剂的使用范围和延长使用寿命上有所突破，将是蒸汽重整装置中很有竞争力的一种制氢方式。

② 部分氧化重整。部分氧化重整将燃料与氧相结合制氢，并生成一氧化碳。部分氧化重整的产氢率比蒸汽重整的低，但它结构紧凑、成本低、启动时间短、动态响应速度快，对燃料的适应性也更强，因而更具潜力。但是，如果采用无催化系统，常有碳烟和其他副产物生成；而采用有催化剂系统，又常因催化剂表面的局部高温而损伤催化剂，在反应过程中的稳定性控制也是一大难题。部分氧化重整最好用纯氧，但价格较高；虽然它也可使用燃料气体与空气混合，但反应后需加净化处理装置，其成本也很高；因此若能开发廉价的纯氧制取装置，部分氧化重整将得到很大突破。

③ 自动供热重整。自动供热重整将燃料与水蒸气两者结合，因此，由水蒸气重整反应吸收的热量平衡了从部分氧化重整反应中所放出的热量。自动供热重整相对于蒸汽重整结构简单，无需庞大的换热装置，制造成本低，对燃料的要求也降低，可使用醇类和重烃类的液体燃料；相对于部分氧化重整来说，自动供热重整由于氧化反应放出的热量直接被吸热的蒸汽重整反应吸收，所以系统的效率也提高了。但自动供热重整要求同时调节好氧气、水蒸气和燃料之间的比例，控制比较困难，并且在重整中易产生积炭现象而损伤催化剂。

④ 等离子体重整。等离子体重整是一种先进的制氢技术，它采用等离子激发重整反应的发生，可在满足制氢效率的情况下进行小规模生产，同时降低成本。一般等离子重整器在中小型制氢系统上经济效益比较明显，因为等离子的能量密度很高，使得重整器结构紧凑、起动快、动态响应快，基本不需要催化剂，而且它对燃料的适应性很强，除轻质烃外，各种重质烃、重油、生物质燃料甚至垃圾燃料都可用。等离子制氢技术可分为热等离子和冷等离子两种，产生氢气的过程与传统技术一样，它也包括蒸汽重整、部分氧化和热分解等。采用热等离子技术，反应气体温度高，热损大且不易控制。温度升高也产生了对电极的腐蚀。等离子重整器不宜工作在高压下，因为在高压下限制了电弧的灵活性，增加了电极的腐蚀，而降低了电极寿命。

2.5.5 质子交换膜燃料电池

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membran Fuel Cell，PEMFC)采用可传导离子的聚合膜作为电解质，所以也称聚合物电解质燃料电池(Proton Exchange Fuel Cell，PEFC)、固体聚合物燃料电池(Solid Polymer Fuel Cell，SPFC)或固体聚合物电解质燃料电池(Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell，SPEFC)。

1. 质子交换膜燃料电池的基本结构

PEMFC 由质子交换膜、催化剂层、扩散层、集流板(又称双极板)组成，如图 2.23 所示。

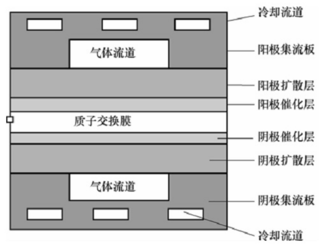


图 2.23 质子交换膜燃料电池结构示意图

(1) 质子交换膜。质子交换膜(PEM)是 PEMFC 中最重要的部件之一，其性能好坏直接影响电池的性能和寿命。质子交换膜燃料电池中的质子交换膜与一般化学电源中使用的隔膜有很大不同，它不只是一种将阳极的燃料与阴极的氧化剂隔开的隔膜材料，还是电解质和电极活性物质(电催化剂)的基底，即兼有隔膜和电解质的作用；另外，PEM 还是一种选择透过性膜，在质子交换膜的高分子结构中，含有多种离子基团。它只允许 H^+ 穿过，其他离子、气体及液体均不能通过。

(2) 电催化剂。为了加快电化学反应速度，气体扩散电极上都含有一定量的催化剂。PEMFC 电催化剂主要有铂系和非铂系电催化剂两类。目前多采用铂催化剂。由于这种电池是在低温条件下工作的，因此，提高催化剂的活性，防止电极催化剂中毒很重要。

(3) 电极。PEMFC 电极是一种多孔气体扩散电极，一般由扩散层和催化层构成。扩散层是导电材料制成的多孔合成物，起着支撑催化层，收集电流，并为电化学反应提供电子通道、气体通道和排水通道的作用。催化层是进行电化学反应的区域，是电极的核心部分，其内部结构粗糙多孔，因而有足够的表面积以促进氢气和氧气的电化学反应。因此电极制作的好坏对电池的性能有重要影响。

(4) 膜电极。膜电极(MEA)是通过热压将阴极、阳极与质子交换膜复合在一起而形成的。为了使电化学反应顺利进行，多孔气体扩散电极必须具备质子、电子、反应气体和水的连续通道。MEA 性能不仅依赖于电催化剂活性，还与电极中四种通道的构成及各种组分的配比、电极孔分布与孔隙率、电导等因素密切相关。

理想的电极结构必须满足以下条件：反应区必须透气(即高气体渗透性)；气体所到之处需要有催化剂粒子，即催化剂必须分布在能接触到气体分子的表面；催化剂又必须与 Nafion 膜聚四氟乙烯的阳离子交换膜接触，以保证反应产生离子的顺利通过(即高质子传导性)；作为催化剂载体的炭黑导电性要高，这将有利于电子转移(即高导电性)，因催化剂不能连成片(必须有很大的催化活性表面才能提高催化反应速度，而片状金属表面积小)，难以作为电导体。所以，催化剂粒子上反应产生或需要的电子必须通过导电性物质与电极沟通；催化剂的稳定性要好。高分散、细颗粒的 Pt 催化剂表面自由能大，很不稳定，需要掺入一些催化剂以降低其表面自由能，或者掺入少量含有能与催化剂形成化学键或弱结合力元素的物质。

(5) 双极板与流场。双极板又称集流板，是电池的重要部件之一，其作用是分隔反应气体，收集电流，将各个单电池串联起来和通过流场为反应气体进入电极及水的排出提供通道。目前，制备 PEMFC 双极板广泛采用的材料是炭质材料、金属材料及金属与炭质的

复合材料。而对金属板，为改善其在电池工作条件下的抗腐蚀性能，必须进行表面改性处理。

PEMFC 的流场板一般是指按一定间隔开槽的石墨板，开的槽就是流道，在槽之间形成流道间隔。流场功能是引导反应气流动方向，确保反应气均匀分配到电极的各处，经电极扩散层到达催化层参与电化学反应。为提高电池反应气体的利用率，通常排放尾气越少越好，流场设计得好坏直接影响电池尾气的排放量。

在常见的 PEM 燃料电池中，有的流场板与双极板是分体的，如网状流场板等；有的流场板与双极板是一体的，如点状流场和部分蛇型流场板等，这样流场除了具有上述流场板的功能以外，还要兼顾双极板的作用。至今已开发点状、网状、多孔体、平行沟槽、蛇型和交指型流场。

通常，PEMFC 的运行需要一系列辅助设备与之共同构成发电系统。PEMFC 系统一般由电池堆、氢气系统、空气系统、水热管理系统和控制系统等构成。

电池堆是系统的核心，承担把化学能转化成电能的任务；氢气系统提供燃料电池正常工作所需的氢气；空气系统提供燃料电池正常工作所需的空气；水热管理系统保证燃料电池堆所需空气、氢气的温度和湿度，保证电池堆在正常温度下工作；控制系统通过检测传感器信号和需求信号，利用一定的控制策略保证系统正常工作。

2. 质子交换膜燃料电池的工作原理

PEMFC 在原理上相当于水电解的“逆”装置。其单电池由阳极、阴极和质子交换膜组成，阳极为氢燃料发生氧化的场所，阴极为氧化剂还原的场所，两极都含有加速电极电化学反应的催化剂，质子交换膜为电解质。其工作原理如图 2.24 所示。

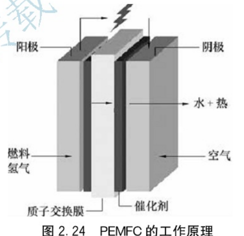


图 2.24　PEMFC 的工作原理

导入的氢气通过阳极集流板(双极板)经由阳极气体扩散层到达阳极催化剂层，在阳极催化剂作用下，氢分子分解为带正电的氢离子(即质子)并释放出带负电的电子，完成阳极反应；氢离子穿过膜到达阴极催化剂层，而电子则由集流板收集，通过外电路到达阴极，电子在外电路形成电流，通过适当连接可向负载输出电能；在电池另一端，氧气通过阴极集流板(双极板)经由阴极气体扩散层到达阴极催化剂层。在阴极催化剂的作用下，氧与透过膜的氢离子及来自外电路的电子发生反应生成水，完成阴极反应；电极反应生成的水大部分由尾气排出，一小部分在压力差的作用下通过膜向阳极扩散。阴极和阳极发生的电化学反应为

$$2H_2 \longrightarrow 4H^+ + 4e^-$$

$$4e^- + 4H^+ + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

电池总的反应为

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

上述过程是理想的工作过程，实际上，整个反应过程中会有很多中间步骤和中间产物的存在。

3. 质子交换膜燃料电池的特点

(1) PEMFC 的优点主要有以下方面：

① 能量转化效率高。过氢氧化合作用，直接将化学能转化为电能，不通过热机过程，不受卡诺循环的限制；

② 可实现零排放。唯一的排放物是纯净水，没有污染物排放，是环保型能源。

③ 运行噪声低，可靠性高。PEMFC 组无机械运动部件，工作时仅有气体和水的流动。

④ 维护方便。PEMFC 内部构造简单，电池模块呈现自然的“积木化”结构，使得电池组的组装和维护都非常方便，也很容易实现“免维护”设计。

⑤ 发电效率平稳。发电效率受负荷变化影响很小，非常适合于用作分散型发电装置(作为主机组)，也适于用作电网的“调峰”发电机组(作为辅机组)。

⑥ 氢来源广泛。氢是世界上最多的元素，氢气来源极其广泛，是一种可再生的能源资源。可通过石油、天然气、甲醇、甲烷等进行重整制氢；也可通过电解水制氢、光解水制氢、生物制氢等方法获取氢气。

⑦ 技术成熟。氢气的生产、储存、运输和使用等技术目前均已非常成熟，安全、可靠。

(2) PEMFC 的缺点。

① 成本高。因为膜材料和催化剂均十分昂贵，但成本在不断地降低，一旦能够大规模生产，比价的经济效益将会充分显示出来。

② 氢要求高。这种电池需要纯净的氢，因为它们极易受到一氧化碳和其他杂质的污染。

因为 PEMFC 的工作温度低，启动速度较高，功率密度较高(体积较小)，所以很适于用作新一代交通工具动力。世界各大汽车集团竞相投入巨资，研究开发电动汽车和代用燃料汽车。从目前发展情况看，PEMFC 是技术最成熟的电动车动力源，PEMFC 电动汽车被业内公认为是电动汽车的未来发展方向。燃料电池将会成为继蒸汽机和内燃机之后的第三代动力系统。

2.5.6 碱性燃料电池

1. 碱性燃料电池的结构与工作原理

碱性燃料电池(Alkaline Fuel Cell，AFC)以强碱(如氢氧化钾、氢氧化钠)为电解质，氢气为燃料，纯氧或脱除微量二氧化碳的空气为氧化剂，采用对氧电化学还原具有良好催化活性的 Pt/C、Ag、Ag-Au、Ni 等为电催化剂制备的多孔气体扩散电极为氧化极，以 Pt-Pd/C、Pt/C、Ni 或硼化镍等具有良好催化氢电化学氧化的电催化剂制备的多孔气体电极为氢电极。以无孔炭板、镍板或镀镍甚至镀银、镀金的各种金属(如铝、镁、铁)板为双极板材料，在板面上可加工各种形状的气体流动通道构成双极板。

图 2.25 为碱性石棉膜型氢氧燃料电池中单电池的工作原理。

在阳极，氢气与碱中的 OH^- 在电催化剂的作用下，发生氧化反应生成水和电子，电子通过外电路达到阴极，在阴极电催化剂的作用下，参与氧的还原反应，生成的 OH^- 通过饱浸碱液的多孔石棉迁移到氢电极。阳极和阴极发生的电化学反应为

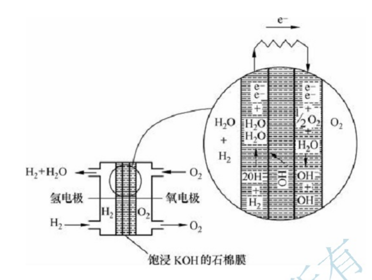


图 2.25　碱性石棉膜型氢氧燃料电池中单电池的工作原理

$$H_2 + 2OH^- \longrightarrow 2H_2O + 2e^-$$

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

总的反应为

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

2. 碱性燃料电池的特点

AFC 与其他类型燃料电池相比，具有以下特点：

(1) AFC 具有较高的效率(50%～55%)。

(2) 工作温度大约 80℃，因此，它们的启动也很快，但其电力密度却比质子交换膜燃料电池的密度低十几倍。

(3) 性能可靠，可用非贵金属作催化剂。

(4) AFC 是燃料电池中生产成本最低的一种电池。

(5) AFC 是技术发展最快的一种电池，主要为空间任务，包括航天飞机提供动力和饮用水，其次则是用于交通工具，具有一定的发展和应用前景。

(6) 使用具有腐蚀性的液态电解质，具有一定的危险性和容易造成环境污染，此外，为解决 CO_2 毒化所采用的一些方法，如使用循环电解液吸收 CO_2 等增加了系统的复杂性。

2.5.7　磷酸燃料电池

磷酸燃料电池(Phosphoric Acid Fuel Cell，PAFC)是以酸为导电电解质的酸性燃料电池。PAFC 被称为继火电、水电、核电之后的第 4 种发电方式，是目前燃料电池中唯一商业化运行的燃料电池。

1. 磷酸燃料电池的结构

PAFC 的电池片由基材及肋条板触媒层所组成的燃料极、保持磷酸的电解质层、与燃料极具有相同构造的空气极构成。在燃料极，燃料中的氢原子释放电子成为氢离子。氢离子通过电解质层，在空气极与氧离子发生反应生成水。将数枚单电池片进行叠加，每枚电池片中

叠加进为降低发电时内部热量的冷却板，从而构成输出功率稳定的基本电池堆。再加上用于上下固定的构件、供气用的集合管等构成PAEC的电池堆。其结构示意如图2.26所示。

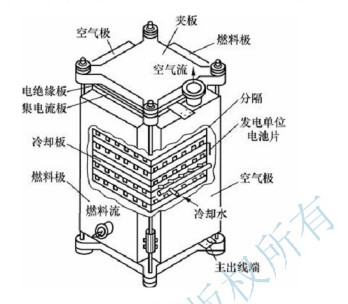


图2.26　电池堆结构示意图

2. 磷酸燃料电池的工作原理

图2.27是PAFC的工作原理图。PAFC使用液体磷酸为电解质，通常位于碳化硅基质中。当以氢气为燃料，氧气为氧化剂时，在电池内发生电化学反应。

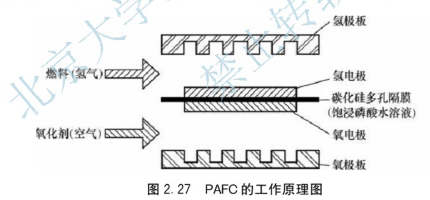


图2.27　PAFC的工作原理图

阳极和阴极发生的电化学反应为

$$H_2 \longrightarrow 2H^+ + 2e^-$$

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$$

总的电化学反应为

$$2H_2 + O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

3. 磷酸燃料电池的特点

PAFC的工作温度要比PEMFC和AFC的工作温度略高，位于150～200℃，但仍需电极上的白金催化剂来加速反应。较高的工作温度也使其对杂质的耐受性较强，当其反应物中含有1%～2%的一氧化碳和百万分之几的硫时，PAFC照样可以工作。

PAFC的效率比其他燃料电池低，约为40%，其加热的时间也比质子交换膜燃料电池长。

PAFC 具有构造简单、稳定、电解质挥发度低等优点。PAFC 可用作公共汽车的动力，而且有许多这样的系统正在运行，不过这种电池很难用在轿车上。目前，PAFC 能成功地用于固定的应用，已有许多发电能力为 0.2～20MW 的工作装置被安装在世界各地，为医院、学校和小型电站提供动力。

2.5.8 熔融碳酸盐燃料电池

1. 熔融碳酸盐燃料电池的结构

熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)是由多孔陶瓷阴极、多孔陶瓷电解质隔膜、多孔金属阳极、金属极板构成的燃料电池。

单体的 MCFC 一般是平板型的，由电极-电解质、燃料流通道、氧化剂流通道和上下隔板组成，如图 2.28 所示。单体的上下为隔板/电流采集板，中间部分是电解质板，电解质板的两侧为多孔的阳极板和阴极板，其电解质是熔融态碳酸盐。

2. 熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)的工作原理

MCFC 的工作原理如图 2.29 所示。

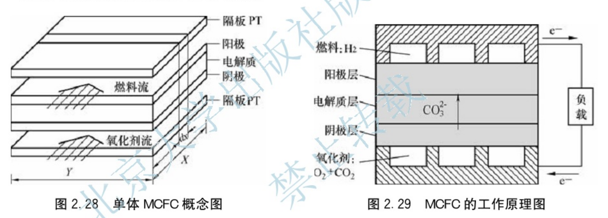


图 2.28 单体 MCFC 概念图　　　图 2.29 MCFC 的工作原理图

燃料电池工作过程实质上是燃料的氧化和氧化剂的还原过程。燃料和氧化剂气体流经阳极和阴极通道。氧化剂中的 O_2 和 CO_2 在阴极与电子进行氧化反应产生 CO_3^{2-}，电解质板中的 CO_3^{2-} 直接从阴极移动到阳极，燃料气体中的 H_2 与 CO_3^{2-} 在阳极发生反应，生成了 CO_2、H_2O 和电子。电子被集流板收集起来，然后到达隔板。隔板位于燃料电池单元的上部和下部，并和负载设备相连，从而构成了包括电子传输和离子移动在内的完整的回路。

其电化学反应式为

$$H_2(a)+CO_3^{2-} \longrightarrow H_2O(a)+CO_2(a)+2e^-(a)$$

$$2CO_2+O_2(c)+4e^-(c) \longrightarrow 2CO_3^{2-}(c)$$

$$2H_2+O_2+2CO_2(c) \longrightarrow 2H_2O+2CO_2(a)+2E^0+Q^0$$

式中，a、c 分别表示阳极、阴极；e^- 表示电子；E^0 表示基本发电量；Q^0 表示基本放热量。

3. 熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)的特点

MCFC 是一种高温电池(600～700℃)，具有效率高(高于 40%)、噪声低、无污染、燃料多样化(氢气、煤气、天然气和生物燃料等)、余热利用价值高和电池构造材料价廉等

诸多优点，是下一世纪的绿色电站。

2.5.9　固体氧化物燃料电池

固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell，SOFC)属于第三代燃料电池，是一种在中高温下直接将储存在燃料和氧化剂中的化学能高效、环境友好地转化成电能的全固态化学发电装置。被普遍认为是在未来会与质子交换膜燃料电池一样得到广泛普及应用的一种燃料电池。

重复单元
连接体
阳极
电触质
阴极

图 2.30　固体氧化物燃料电池的基本组成

1. 固体氧化物燃料电池的结构

SOFC 单体主要由电解质、阳极或燃料极、阴极或空气极和连接体或双极板组成，如图 2.30 所示。

固体电解质是 SOFC 最核心的部件，它的主要功能在于传导氧离子。它的性能(包括电导率、稳定性、热膨胀系数、致密化温度等)不但直接影响电池的工作温度及转换效率，还决定了与之相匹配的电极材料及其制备技术的选择。目前常用的电解质材料是 Ni 粉弥散在 YSZ 的金属陶瓷，其离子电导率在氧分压变化十几个数量级时，都不发生明显变化。

电极材料本身首先是一种催化剂。阴极需要长期在高温和氧化中工作，起传递电子和扩散氧作用，应是多孔洞的电子导电性薄膜。SOFC 的工作温度高，只有贵金属或电子导电的氧化物适用于阴极材料，由于铂、钯等贵金属价格昂贵，一般只在实验范围内使用。实际常应用掺锶的锰酸镧作为 SOFC 的阴极材料。目前，Ni/YSZ 陶瓷合金造价最低，是实际应用中首选的阳极材料。

连接材料在单电池间起连接作用，并将阳极侧的燃料气体与阴极侧氧化气体(氧气或空气)隔离开来。钙钛矿结构的铬酸镧常用作 SOFC 的连接体材料。

2. 固体氧化物燃料电池的工作原理

SOFC 工作时，电子由阳极经外电路流向阴极，氧离子经电解质由阴极流向阳极。图 2.31 为 SOFC 的工作原理示意图。

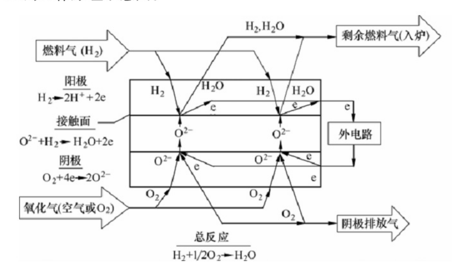


图 2.31　SOFC 工作原理示意图

在阴极发生氧化剂(氧或空气)的电还原反应，即氧分子得到电子被还原为氧离子。阴极的电化学反应为

$$O_2+4e^- \longrightarrow 2O^{2-}$$

氧离子 O^{2-} 在电解质隔膜两侧电位差与浓差驱动力的作用下，通过电解质隔膜中的氧空位，定向跃迁到阳极侧。

在阳极发生燃料(氢或富氢气体)的电氧化反应，即燃料(如氢)与经电解质传递过来的氧离子进行氧化反应生成水，同时向外电路释放电子，电子通过外电路到达阴极形成直流电。

分别用 H_2、CO、CH_4 作燃料时，阳极反应为

$$H_2+O^{2-} \longrightarrow H_2O+2e^-$$

$$CO+O^{2-} \longrightarrow CO_2+2e^-$$

$$CH_4+4O^{2-} \longrightarrow 2H_2O+CO_2+8e^-$$

以 H_2 为例，电池的总反应为

$$2H_2+O_2 \longrightarrow 2H_2O$$

3. 固体氧化物燃料电池的特点

(1) SOFC的优点。SOFC除具备燃料电池高效、清洁、环境友好的共性外，还具有以下优点：

① SOFC是全固态的电池结构，不存在电解质渗漏问题，避免了使用液态电解质所带来的腐蚀和电解液流失等问题，无需配置电解质管理系统，可实现长寿命运行；

② 对燃料的适应性强，可直接用天然气、煤气和其他碳氢化合物作为燃料；

③ SOFC直接将化学能转化为电能，不通过热机过程，因此不受卡诺循环的限制。发电效率高，能量密度大，能量转换效率高；

④ 工作温度高，电极反应速度快，不需要使用贵金属作电催化剂；

⑤ 可使用高温进行内部燃料重整，使系统优化；

⑥ 低排放、低噪声；

⑦ 废热的再利用价值高。

⑧ 陶瓷电解质要求中、高温运行(600～1000℃)，加快了电池的反应进程，还可以实现多种碳氢燃料气体的内部还原，简化了设备。

(2) SOFC的不足之处。

① 氧化物电解质材料为陶瓷材料，质脆易裂，电池堆组装较困难；

② 高温热应力作用会引起电池龟裂，所以主要部件的热膨胀率应严格匹配；

③ 存在自由能损失；

④ 工作温度高，预热时间较长，不适用于需经常启动的非固定场所。

早期开发出来的SOFC的工作温度较高，一般在800～1000℃。目前科学家已经研发成功中温固体氧化物燃料电池，其工作温度一般在800℃左右。一些国家的科学家也正在努力开发低温SOFC，其工作温度更可以降低至650～700℃。工作温度的进一步降低，使得SOFC的实际应用成为可能。

单体电池只能产生1V左右电压，功率有限，为了使得SOFC具有实际应用可能，需要大大提高SOFC的功率。为此，可以将若干个单电池以各种方式(串联、并联、混联)组

装成电池组。目前 SOFC 组的结构主要有管状、平板型和整体型 3 种，其中平板型因功率密度高和制作成本低而成为 SOFC 的发展趋势。

SOFC 的能量密度高、燃料范围广和结构简单等优点是其他燃料电池无法比拟的。随着 SOFC 的生产成本和操作温度进一步降低，能量密度的增加和启动时间进一步缩短，可以预见，SOFC 在今后的燃料电池电动汽车发展中有比较广阔的发展前景。

2.5.10 直接甲醇燃料电池

直接甲醇燃料电池(Direct Methanol Fuel Cell，DMFC)，属于质子交换膜燃料电池中的一类，是直接使用水溶液以及蒸气甲醇为燃料供给来源，而不需通过重整器重整甲醇、汽油及天然气等再取出氢以供发电。

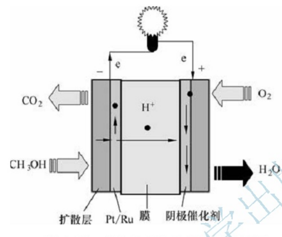


图 2.32 DMFC 的结构与原理示意图

1. 直接甲醇燃料电池的结构与原理

DMFC 主要由阳极、固体电解质膜和阴极构成。阳极和阴极分别由多孔结构的扩散层和催化剂层组成，通常使用不同疏水性、亲水性的炭黑和聚四氟乙烯作为 DMFC 的阳极和阴极材料，如图 2.32 所示。

以甲醇为燃料，将甲醇和水混合物送至 DMFC 阳极，在阳极甲醇直接发生电催化氧化反应生成 CO_2，并释放出电子和质子。阴极氧气发生电催化氧还原反应，与阳极产生的质子反应生成水。电子从阳极经外电路转移至阴极形成直流电，工作温度为 25～135℃。

阳极和阴极发生的电化学反应为

$$CH_3OH + H_2O \longrightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$$

$$3O_2 + 12e^- + 6H_2O \longrightarrow 12OH^-$$

总的电化学反应为

$$CH_3OH + 3/2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$$

2. 直接甲醇燃料电池的特点

DMFC 的突出特点如下：

(1) 甲醇来源丰富，价格低廉，储存携带方便；

(2) 与氢-氧 PEMFC 相比，结构更简单，操作更方便；

(3) 与 PEMFC 相比，体积能量密度更高；

(4) 与重整式甲醇燃料电池相比，它没有甲醇重整装置，质量更轻，体积更小，响应时间更快。

其缺点是当甲醇低温转换为氢和二氧化碳时要比常规的质子交换膜燃料电池需要更多的白金催化剂。

DMFC 使用的技术仍处于其发展的早期，但已成功地显示出可以用作移动电话和膝上计算机的电源，将来可能成为可携式电子产品应用和交通工具用电源的主流。

2.5.11 微生物燃料电池

微生物燃料电池是利用电池的阳极来代替氧或硝酸盐等天然的电子受体，通过电子的不断转移来产生电能。微生物氧化燃料所生成的电子通过细胞膜相关联组分或者通过氧化还原介体传递给阳极，再经过外电路转移到阴极，在阴极区电子将电子受体(如氧)还原，然后透过质子交换膜转移过来的质子结合生成水。

微生物燃料电池本质上是收获微生物代谢过程中生产的电子并引导电子产生电流的系统。微生物燃料电池的功率输出取决于系统传递电子的数量和速率以及阳极与阴极间的电位差。由于微生物燃料电池并非一个热机系统，避免了卡诺循环的热力学限制，因此，理论上微生物燃料电池是化学能转变为电能最有效的装置，最大效率有可能接近100%。

与其他燃料电池相比，微生物燃料电池在温度(常温)、电极(无需贵金属电极)、燃料(无需纯化)等方面具有优势。虽然单个微生物燃料电池的工作电压只有0.15V左右，但许多个微生物燃料电池堆叠就可产生较高的电压，满足对低电压用电的需求。

目前，研究工作者已在微生物燃料电池设计和提高输出功率方面取得了较大进展，并在降低电极和PEM等材料的成本、设计无介体无膜系统、提高系统运行负荷和运行连续性等方面也取得了可喜的进展。但要实现技术从实验室到工业化应用的转换仍面临不少难题。

微生物燃料电池作为一种可再生的清洁能源技术的研究正在国内外迅速兴起，势必将得到不断的推广和应用，为节能减排、治理污染做出重要的贡献。

2.5.12 再生型燃料电池

再生型燃料电池由电解池和燃料电池组成，向日时，太阳能发电并电解水，生成氢气与氧气储存起来；背日时，燃料电池发电，生成水，水可以循环使用，并保持储能基本恒定。再生型燃料电池具有高的比能量和比功率，使用中无自放电且无放电深度及电池容量的限制。

再生型燃料电池的概念相对较新，但全球有许多研究小组正在从事这方面的工作。这一技术与普通燃料电池的相同之处在于它也用氢和氧来生成电、热和水。其不同的地方是它还进行逆反映，也就是电解。燃料电池中生成的水再送回到以太阳能为动力的电解池中，在那儿分解成氢和氧组分，然后这种组分再送回到燃料电池。这种方法就构成了一个封闭的系统，不需要外部生成氢。

美国等发达国家非常重视再生燃料电池技术的研究开发，已经把再生燃料电池技术应用于航空航天领域，并将再生燃料电池技术视为今后“空间可再生能源技术”的重要发展方向之一。德国、日本等国家在RFC领域也有一定规模的研究。

目前，商业化开发业已走了一段路程，但仍有许多问题尚待解决，例如，成本问题，及进一步改进太阳能利用的稳定性等问题。

2.6 太阳能电池

太阳能电池是利用太阳光和材料相互作用直接产生电能的，是对环境无污染的可再生能源。它的应用可以解决人类社会发展在能源需求方面的问题。太阳能是一种储量极其丰

富的洁净能源，太阳每年向地面输送的能量高达 3×10^{24} J，相当于世界年耗能量的 1.5 万倍。因此太阳能电池作为人们利用可持续的太阳能资源，是解决世界范围内的能源危机和环境问题的一条重要途径。

2.6.1 太阳能电池的分类

1. 按不同材料分类

太阳能电池按照材料不同，主要有硅系列太阳能电池和化合物系列太阳能电池。

(1) 硅系列太阳能电池。硅系列太阳能电池是以硅材料为基体的太阳能电池，分为单晶硅太阳能电池、多晶硅薄膜太阳能电池和非晶硅薄膜太阳能电池等。

(2) 化合物系列太阳能电池。多元化合物薄膜太阳能电池材料为无机盐，其主要包括砷化镓、硫化镉、碲化镉及铜铟硒薄膜电池等。

2. 按结构分类

太阳能电池按照结构不同，可以分为同质结电池、异质结电池、肖特基结电池、光电化学电池等。

(1) 同质结电池。由同一种半导体材料构成一个或多个 PN 结的电池。如硅太阳能电池、砷化镓太阳能电池等。

(2) 异质结电池。用两种不同的半导体材料，在相接的界面上构成一个异质结的太阳能电池。如氧化铟锡/硅电池、硫化亚铜/硫化镉电池等。如果两种异质材料晶格结构相近，界面处的晶格匹配较好，则称为异质面电池，如砷化铝镓/砷化镓电池。

(3) 肖特基结电池。用金属和半导体接触组成一个“肖特基势垒”的电池，也称 MS 电池。目前已发展成金属—氧化物—半导体电池(MOS)和金属—绝缘体—半导体电池(MIS)，这些又总称为导体—绝缘体—半导体电池。

(4) 光电化学电池。其是用浸于电解质中的半导体电极构成的电池，又称为液结电池。

2.6.2 太阳能电池的特点

单晶硅太阳能电池转换效率最高，技术也最为成熟。转换效率为 15%～17%。在大规模应用和工业生产中仍占据主导地位，但由于单晶硅成本价格高，大幅度降低其成本很困难，为了节省硅材料，发展了多晶硅薄膜和非晶硅薄膜作为单晶硅太阳能电池的替代产品。

多晶硅薄膜太阳能电池与单晶硅比较，成本低廉，而效率高于非晶硅薄膜电池，其转换效率为 12%～14%。因此，多晶硅薄膜电池将会在太阳能电池市场上占据主导地位。

非晶硅薄膜太阳能电池成本低、质量轻，转换效率为 6%～10%，便于大规模生产，有极大的潜力。但受制于其材料引发的光电效率衰退效应，稳定性不高，直接影响了它的实际应用。如果能进一步解决稳定性问题及提高转换率问题，那么，非晶硅太阳能电池无疑是太阳能电池的主要发展产品之一。

硫化镉、碲化镉多晶薄膜电池的效率较非晶硅薄膜太阳能电池效率高，成本较单晶硅电池低，并且也易于大规模生产，但由于镉有剧毒，会对环境造成严重的污染，因此，并不是晶体硅太阳能电池最理想的替代产品。

砷化镓化合物电池的转换效率可达 28%。砷化镓化合物材料具有十分理想的光学带隙以及较高的吸收效率，抗辐照能力强，对热不敏感，适合于制造高效单结电池。但是砷化

镓材料的价格不菲，因而在很大程度上限制了砷化镓电池的普及。

铜铟硒薄膜电池适合光电转换，不存在光衰退问题，转换效率和多晶硅一样，具有价格低廉、性能良好和工艺简单等优点，将成为今后发展太阳能电池的一个重要方向。唯一的问题是材料的来源，由于铟和硒都是比较稀有的元素，因此，这类电池的发展又必然受到限制。

2.6.3 太阳能电池的发电原理

太阳能电池的发电原理是基于半导体的光生伏特效应将太阳辐射能直接转换为电能。在晶体中电子的数目总是与核电荷数相一致，所以P型硅和N型硅是电中性的。如果将P型硅或N型硅放在阳光下照射，光的能量通过电子从化学键中被释放，由此产生电子-空穴对，但在很短的时间内(在微秒范围内)电子又被捕获，即电子和空穴“复合”。

当P型材料和N型材料相接，将在晶体中P型和N型材料之间形成界面，即P-N结。此时在界面层N型材料中的自由电子和P型材料中的空穴相对应。由于正负电荷之间的吸引力，在界面层附近N型材料中的电子扩散到P型材料中，而空穴扩散到N型材料中与自由电子复合。这样在界面层周围形成一个无电荷区域。通过界面层周围的电荷交换形成两个带电区，即通过电子到P型材料的迁移在N型形成一个正的空间电荷区和在P型区形成一个负的空间电荷区。

对不同材料的太阳能电池，尽管光谱响应的范围是不同的，但光电转换的原理是一致的。如图2.33所示，在P-N结的内静电场作用下，N区的空穴向P区运动，而P区的电子向N区运动，最后造成在太阳能电池受光面(上表面)有大量负电荷(电子)积累，而在电池背光面(下表面)有大量正电荷(空穴)积累。如在电池上、下表面引出金属电极，并用导线连接负载，在负载上就有电流通过。只要太阳光照不断，负载上就一直有电流通过。

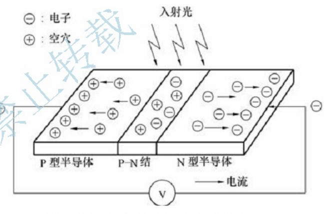


图2.33 硅太阳能电池的发电原理

2.6.4 太阳能电池的伏安特性

太阳能电池经光照射后可以发电并带动负荷，表征光伏发电的特性称为伏安特性。

如果在太阳能电池两端接上一个负载电阻R，那么太阳能电池在工作状态下的等效电路如图2.34所示。它相当于一个恒流源与一只正向二极管并联，流过二极管的电流在太阳能电池中称为暗电流，这是理想太阳能电池的等效电路。

图2.34 太阳能电池的等效电路

电池的理想伏安特性为

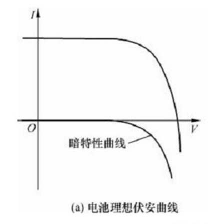
$$I=I_{ph}-I_D=I_{ph}-I_0(e^{\frac{qV}{KT}}-1) \qquad (2-17)$$

式中，I为流过负载的电流；I_{ph}为光电流；I_D为暗电流；I_0为二极管饱和电流；V为二极管的端电压；q为电荷电量；K为玻耳兹曼常

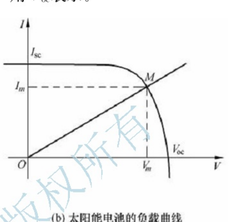
数；T 为绝对温度。

光照下硅太阳能电池的特性参数有短路电流、开路电压、填充因子和效率。

电池理想伏安曲线如图 2.35 (a)所示。图中还画出暗特性曲线，即无光照时的 $I-V$ 曲线。太阳能电池的负载特性曲线如图 2.35(b)所示，曲线上的点称为工作点，随负载变化而变化。如果太阳能电池电路短路，即 $V=0$，此时的电流为短路电流，用 I_{sc}表示；如果电路开路，即 $I=0$，此时的电压为开路电压，用 V_{oc}表示。



(a) 电池理想伏安曲线



(b) 太阳能电池的负载曲线

图 2.35　太阳能电池伏安曲线

由式(2-17)可得

$$I_{sc}=I_{ph}$$
$$V_{oc}=\frac{KT}{q}\ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}+1\right) \tag{2-18}$$

调节负载电阻到某一值 R_m 时，曲线上有一点 M 满足输出功率 P 最大，称为最大功率点。该点所对应的电流称为最大功率点电流 I_m 所对应的电压称为最大功率点电压 V_m，该点对应的功率则称为最大功率 P_m。

$$P_m=I_mV_m \tag{2-19}$$

定义填充因子 FF 为太阳能电池最大功率与开路电压和短路电流乘积的比值。

$$FF=\frac{P_m}{V_{oc}\times I_{sc}} \tag{2-20}$$

填充因子是评价太阳能电池输出特性好坏的一个重要参数，它的值越高，表明太阳能电池输出特性越趋近于矩形，太阳能电池性能越好。硅太阳能电池的填充因子的值为 0.7～0.85。

P_m 可以表示为

$$P_m=V_{oc}\times I_{sc}\times FF \tag{2-21}$$

因此，在一定的光照下，为了有尽量大的功率输出，就要获得尽量大的开路电压、短路电流和填充因子。

电池的最大功率点的输出功率与入射光功率之比称为光电转换效率，简称效率。

$$\eta=\frac{P_m}{P_{in}}\times 100\%=\frac{V_{oc}\times I_{sc}\times FF}{P_{in}}\times 100\% \tag{2-22}$$

式中，P_{in}为太阳辐射功率。

由式(2－22)可知，影响太阳能电池转换效率的参数有开路电压、短路电流和填充因子。但开路电压、填充因子均受暗电流影响很大，因此，太阳能电池的转换效率主要取决于其暗电流特性和短路电流的大小。

对于实际太阳能电池，影响转换效率的主要因素：一个是串联电阻，主要包括正面金属电极与半导体材料的接触电阻、半导体材料的体电阻和电极电阻3部分；另外一个是并联电阻，主要原因是电池边缘漏电或耗尽区内的复合电流引起的。

2.7 其他动力电池

2.7.1 镍镉电池

镍镉电池是一种碱性蓄电池，它的比能量可达55Wh/kg，比功率超过190W/kg，可快速充电，循环使用寿命较长，可达到2000次以上。使用中要注意做好回收工作，以免重金属镉造成环境污染。

镍镉电池的结构与原理与镍氢电池相似。

1. 镍镉电池的结构

镍镉电池正极板上的活性物质由氧化镍粉和石墨粉组成，石墨不参加化学反应，其主要作用是增强导电性。

负极板上的活性物质由氧化镉粉和氧化铁粉组成，氧化铁粉的作用是使氧化镉粉有较高的扩散性，防止结块，并增加极板的容量。活性物质分别包在穿孔钢带中，加压成型后即成为电池的正负极板。极板间用耐碱的硬橡胶绝缘棍或有孔的聚氯乙烯瓦楞板隔开。

电解液通常为氢氧化钠或氢氧化钾溶液。当环境温度较高时，使用相对密度为1.17～1.19(15℃时)的氢氧化钠溶液。当环境温度较低时，使用相对密度为1.19～1.21(15℃时)的氢氧化钾溶液。在－15℃以下时，使用相对密度为1.25～1.27(15℃时)的氢氧化钾溶液。为兼顾低温性能和荷电保持能力，密封镍镉蓄电池采用相对密度为1.40(15℃时)的氢氧化钾溶液。为了增加蓄电池的容量和循环寿命，通常在电解液中加入少量的氢氧化锂(大约每升电解液加15～20g)。

2. 镍镉电池充放电时的电化学反应

镍镉电池放电时负极和正极发生的电化学反应为

$$Cd^{2+} - 2e^- + 2OH^- \longrightarrow Cd(OH)_2$$

$$NiOOH + H_2O + e^- \longrightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$$

总的电化学反应为

$$2NiOOH + 2H_2O + Cd^{2+} \longrightarrow 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2$$

镍镉电池充电时负极和正极发生的电化学反应为

$$Ni(OH)_2 - e^- + OH^- \longrightarrow NiOOH + H_2O$$

$$Cd(OH)_2 + 2e^- \longrightarrow Cd + 2OH^-$$

总的电化学反应为

$$2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2 \longrightarrow 2NiOOH + Cd + 2H_2O$$

与其他电池相比，镍镉电池的自放电率适中。镍镉电池在使用过程中，如果放电不完全就又充电，下次再放电时，就不能放出全部电量。例如，放出80%电量后再充足电，该电池只能放出80%的电量。这就是所谓的记忆效应。当然，几次完整的放电/充电循环将使镍镉电池恢复正常工作。由于镍镉电池的记忆效应，若未完全放电，应在充电前将每节电池放电至1V以下。

3. 镍镉电池的容量

镍镉电池的容量与活性物质的数量、放电率和电解液等因素有关。

放电电流直接影响放电终止电压。在规定的放电终止电压下，放电电流越大，蓄电池的容量越小。

使用不同成分的电解液，对蓄电池的容量和寿命有一定的影响。通常，在高温环境下，为了提高电池容量，常在电解液中添加少量氢氧化锂，组成混合溶液。实验证明：每升电解液中加入15～20g含水氢氧化锂，在常温下，容量可提高4%～5%，在40℃时，容量可提高20%。然而，电解液中锂离子的含量过多，不仅使电解液的电阻增大，还会使残留在正极板上的锂离子慢慢渗入晶格内部，对正极的化学变化产生有害影响。

电解液的温度对蓄电池的容量影响较大。这是因为随着电解液温度升高，极板活性物质的化学反应也逐步改善。

电解液中的有害杂质越多，蓄电池的容量越小。主要有害杂质是碳酸盐和硫酸盐。它们能使电解液的电阻增大，并且低温时容易结晶，堵塞极板微孔，使蓄电池容量显著下降。此外，碳酸根离子还能与负极板作用，生成碳酸镉附着在负极板表面上，从而引起导电不良，使蓄电池内阻增大，容量下降。

在正常使用的条件下，镍镉电池的容量效率为67%～75%，电能效率为55%～65%，循环寿命约为2000次。

2.7.2 锌镍电池

锌镍电池由镍电极和锌电极组成，兼有镍镉电池中镍正极长寿命和锌银电池中锌负极高容量的优越性能，是一种高性能绿色二次动力电池。

1. 锌镍电池的结构

锌镍电池的正极为氧化镍电极，负极为锌电极；锌电极外包裹多层隔膜，隔膜一般为无纺布(常用的有聚丙烯和聚酰胺两种)，分为储存电解液的吸液隔膜和防止锌枝晶穿透的隔膜；电极以极耳引出。除了这些基本组成单元之外，锌镍电池的组成还包含电解液、气阀、辅助电极和电池容器等。

(1) 锌电极。锌电极的主要活性物质为氧化锌，负极由氧化锌、金属锌粉、改善电极性能的导电剂、少量的添加剂和聚四氟乙烯乳液等混合压制而成。锌电极的主要制备方法有压成法、涂膏法、烧结法、电沉积法以及化成法等。目前在各种锌电池中，锌电极一般采用多孔电极形式。锌电极在循环过程会不断地溶解，从而造成锌电极的形变、钝化、枝晶等问题，所以在锌负极中必须添加大量的添加剂抑制这些问题的出现。

(2) 镍电极。镍电极采用$Ni(OH)_2$作为活性材料。根据所用的基底和制备方法不同，镍电极可以分为非烧结型镍电极、烧结型镍电极和电化学沉积轻质镍电极。前两种类型是目前主要使用的镍电极，烧结式正极较为传统，而要得到高容量、高活性的正极，一般采

用非烧结式正极，即以高孔隙率的泡沫镍或纤维镍材料作为骨架，填涂高密度的球形氢氧化镍。电化学沉积轻质镍电极应用不多。

（3）隔膜。隔膜置于电池的正负极之间，防止正负极活性材料直接接触造成电池内部短路。隔膜的性能好坏是影响蓄电池电性能和机械性能的主要因素，因此锌镍电池隔膜有很高的要求，除了要能抗锌枝晶穿透外，还要能耐强碱、抗氧化、易被电解液润湿、具有好的机械强度和充分的柔韧性、低电阻和高离子导电性，这些要求在单一隔膜上都具备很困难，因此目前锌镍电池都是将多种隔膜组合使用，常用的隔膜为尼龙无纺布和聚丙烯毡。

（4）电解液。锌镍电池的电解液一般采用 6mol/L 的 KOH 水溶液。由于电池在长期使用过程中，$Ni(OH)_2$ 晶粒会逐渐聚结而造成充电困难，因此实际生产中的电解液通常添加适量的 LiOH，一般为 0.6mol/L。

2. 锌镍电池的电化学反应机理

锌镍电池使用 $Ni(OH)_2/NiOOH$ 作为正极（阳极），ZnO/Zn 作为负极（阴极），KOH 水溶液作为电解液。放电时，金属 Zn 被氧化为 ZnO，NiOOH 还原为 $Ni(OH)_2$，充电时反之。

锌镍电池放电时负极和正极发生的电化学反应为

$$Zn+2OH^- \longrightarrow ZnO+H_2O+2e$$

$$2NiOOH+H_2O+2e \longrightarrow Ni(OH)_2+2OH^-$$

总的电化学反应为

$$Zn+2NiOOH \longrightarrow ZnO+Ni(OH)_2$$

锌镍电池的理论开路电压是 1.3V，其中负极电位 −1.24V，正极电位 0.49V。KOH 水溶液在电池电化学反应中不仅起离子迁移电荷作用，而且 H_2O 与 OH^- 在充放电过程中参与了电极反应。

若电池过充电，氢氧化镍电极上产生 O_2，锌电极上生成 H_2，这些气体可能会结合形成水，负极和正极发生的电化学反应为

$$H_2O+2e^- \longrightarrow H_2+2OH^-$$

$$2OH^- \longrightarrow \frac{1}{2}O_2+H_2O+2e^-$$

总的电化学反应为

$$H_2O \longrightarrow H_2+\frac{1}{2}O_2$$

过充电时在氢氧化镍电极上产生的 O_2 也可能在锌电极上直接与金属锌结合生成氧化锌。H_2 和 O_2 的产生增加了电池内压，使电池密封困难。过充电时，氢氧化镍电极上产生 O_2 和锌电极上生成 H_2，这两个反应的发生取决于正负极上活性材料数量和它们的利用率。

3. 锌镍电池的特点

锌镍电池具有以下优点：

（1）比能量高，可达 50～80W·h/kg，明显高于铅酸和镍镉电池；

（2）比功率高，仅次于锂离子电池；

(3) 工作电压高，可达 1.65V，高于镍氢和镍镉电池；

(4) 工作温度宽，为－20～60℃；

(5) 无记忆效应；

(6) 电池的生产和使用过程对环境不产生污染；

(7) 价格低。

锌镍电池的寿命问题一直是商品化的重大障碍。因此延长锌镍电池的寿命是问题的关键。据报道，由于采用一种新的锌阳极化学体系，在放电深度为 80%时，锌镍电池的循环寿命达到了 600～1000 次。据此认为锌镍电池系列将是电动车应用有力的竞争者。影响锌镍电池寿命的因素有 3 个方面，锌电极的变形和锌枝晶的产生，隔膜的氧化和穿透，镍电极的毒化。

表 2－5 列出了当前锌镍电池和动力型电池主要性能的比较。从表中对比可以发现锌镍电池的显著优势。锌镍电池这一绿色电源，将成为其他电池的有力竞争者，在汽车动力电源和手提式电子仪器方面展示出了广阔的应用前景。

表 2－5 锌镍电池和其他动力型电池主要性能的比较

电池种类	工作电压/V	比能量/(W・h/kg)	比功率/(W/kg)	循环寿命/次	存在问题
锌镍电池	1.2～1.6	50～80	500	200～300	循环寿命短
铅酸电池	1.5～1.8	25～35	50～200	250～450	体积大、比能量低、寿命短、容易腐蚀、环保性能差
镍镉电池	1.0～1.2	30～45	500	500	记忆效应，镉对环境有害，高温充电性能差
镍氢电池	1.2	60～70	100～200	500	价格高，高温充电性能差
锂离子电池	3.6	120～150	大于 800～1000	800	价格高，存在安全性问题

4. 锌镍电池的应用

目前锌镍电池已达到较高的技术水平，是众多候选电池的主要对象，可与其他电池进行竞争。美国电化学公司制定了近期目标是把锌镍电池作为工业的、军用的和消费商品的动力源及小客车、运货车的启动照明点火电源，长远计划是将其作为电动汽车的动力电源。电动汽车锌镍电池的目标应达到一次充电行驶 240km，总里程 160000km，估价约 200 美元/(kW・h)。澳大利亚已研制出了小型圆筒形锌镍电池，日本已生产出 PZ－60 型和 YNZ10－6 密封锌镍电池，美国研制出了带气塞的 60Ah 和 225Ah 锌镍电池，日本电池公司及古河公司等对锌镍电池在电动车上的应用寄予希望。长寿命密封锌镍电池的试用促进了电动汽车的发展，这将给蓄电池的市场带来繁荣与竞争。

2.7.3 空气电池

金属空气电池是用金属燃料代替氢能源而形成的一种新概念电池，有望成为新一代绿色能源。它具备燃料电池的众多优点，将锌、铝等金属像氢气一样提供到电池中的反应位置，与氧气一起构成一个连续的电能产生装置，并具有无毒、无污染、放电电压平稳、高

比能量、内阻小、储存寿命长、价格相对较低、工艺技术要求较低、高比功率等优点，既有丰富的廉价资源，又可再生利用，而且比氢燃料电池结构简单，是很有发展和应用前景的新能源。

1. 锌空气电池

锌空气电池是以空气中的氧气为正极活性物质，金属锌为负极活性物质的一种新型化学电源。锌空气电池是一种半蓄电池半燃料电池。首先，负极活性物质同锌锰、铅酸等蓄电池一样封装在电池内部，具有蓄电池的特点；其次，正极活性物质来自电池外部的空气中所含的氧，理论上有无限容量，是燃料电池的典型特征。

锌空气电池可以表达为

$$(-)Zn|KOH|O_2(空气)(+)$$

锌空气电池放电时阳极和阴极发生的电化学反应为

$$Zn+4OH^- \longrightarrow Zn(OH)_4^{2-}+2e^-$$

$$Zn(OH)_4^{2-} \longrightarrow ZnO+2OH^-+H_2O$$

$$O_2+2H_2O+4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

总的电化学反应为

$$2Zn+O_2 \longrightarrow ZnO$$

(1) 锌空气电池的优点。

① 比能量高。由于正极活性物质来自电池的外部，无须占用电池的空间，在相同体积、质量的情况下，锌空气电池内可以装入更多的负极活性物质，使得锌空气电池比普通电池的容量高出很多，其理论比能量达到 1350W·h/kg 以上，实际比能量在 1000W·h/kg 以上，属于大容量高能化学电源。

表 2-6 是几种电池比能量的比较。

表 2-6 几种电池比能量的比较

电池种类	比能量/(W·h/kg)	能量密度/(W·h/L)
铅酸蓄电池	35	79
镍氢电池	50	160
镍镉电池	35	80
锂离子电池	90	200
锌空气电池	340	1050

② 价格低廉。阳极活性物质锌来源丰富，价格便宜。阴极活性物质氧气来源于周围空气，基本等同于现在普通使用的铅酸蓄电池。

③ 性能稳定，放电平稳。因放电时阴极催化剂本身不起变化，加之锌电极电压稳定，故放电时电压变化很小。

④ 储存特性极佳。锌空气原电池实际上是属于储备型电池。因为在储存过程均采用密封措施，将电池的空气孔与外界空气隔离，因而电池的容量损失极小，每年小于 2%。

⑤ 安全可靠，无污染。从生产到使用，从新产品到废品回收，都不会污染环境，更不会燃烧爆炸，堪称绿色能源。

(2) 锌空气电池的缺点。由于锌空气电池采用多孔气体电极，而且阴极活性物质氧气来源于周围空气，使得电极工作时暴露于空气中，电池的这一固有特点，对电池的使用寿命与性能产生很大的危害，主要有以下几点：

① 电解液存在水分的蒸发或吸潮问题。由于空气电极露于空气中，必然会发生电解液水分的蒸发和吸潮问题，这将改变电解液的性能，从而使电池性能下降。

② 锌电极的直接氧化。由于空气电极中的氧直接进入电池溶于电解液，在反应过程中形成 H_2O，如果形成的 H_2O 未分解，会在空气电极周围积累，使空气电极电位负移，锌电极直接氧化，从而锌电极出现钝化，降低了锌电极的活性。

③ 锌枝晶的生长。由于锌电极本身的自放电反应，会使锌腐蚀产生锌枝晶，当锌枝晶生长到一定程度，它就会刺穿电池隔膜，使电池发生短路，降低电池性能。

④ 电解液碳酸化。在空气中的氧进入电池的同时，空气中的二氧化碳也进入电池，溶于电解液中，使得电解液碳酸化，导致电解液的导电性能下降，电池内阻增大，同时碳酸盐在正极上的析出使正极的性能下降，不仅影响了电池的放电性能，而且使电池的使用寿命受到很大影响。

⑤ 空气电极催化剂活性偏低。选择空气电极的催化剂，改善空气电极的极化特征，提高电池的工作电压及开路电压，是非常重要的。过去空气电极采用铂、铑、银等贵金属作催化剂，催化效果比较好，但是这使得电池的成本很高，电池很难商品化。后来采用别的催化剂，如炭黑、石墨与二氧化锰的混合物，锌空气电池的成本降低了，但是催化剂活性偏低，影响电池的充、放电电流密度。

此外，锌空气电池还有工作温度范围不宽、间歇放电性能差、容易漏液爬碱、电池及其附属设施的结构复杂且电池的抗振性能较差等问题都是锌空气电池大量应用的障碍，因此，发展锌空气电池，需要排除这些不利因素。

2. 铝空气电池

铝空气电池是用高纯铝或铝合金作阳极，用空气(氧)电极作阴极，用碱或盐作电解液。在放电过程中阳极溶解，空气中的氧被还原而释放出电能。

铝空气电池可以表达为

$$(-)Al|电解液|O_2(空气)(+)$$

铝空气电池放电时阳极的电化学反应为

$$Al-3e \longrightarrow Al^{3+}$$

$$Al^{3+}+3OH^- \longrightarrow Al(OH)_3 \quad (中性溶液)$$

$$Al^{3+}+4OH^- \longrightarrow Al(OH)_4^- \quad (碱性溶液)$$

阴极的电化学反应为

$$O_2+2H_2O+4e^- \longrightarrow 4OH^-$$

铝空气电池总的电极反应为

$$4Al+3O_2+6H_2O \longrightarrow 4Al(OH)_3 \quad (中性溶液)$$

$$4Al+3O_2+4OH^-+6H_2O \longrightarrow 4Al(OH)_4^- \quad (碱性溶液)$$

另外，铝在两种条件下都存在腐蚀反应

$$2Al+6H_2O \longrightarrow 2Al(OH)_3+3H_2$$

铝空气电池具有如下优越性：

(1) 铝是一种活泼金属，它比锌、镁之类的金属更有吸引力。铝的电化学当量很高，为2980A·h/kg，是除锂之外比能量最高的金属，铝空气电池的比能量实际可达到450W·h/kg，比能量密度小于铅酸蓄电池，比功率为50～200W/kg，寿命达3～4年。因此，对铝的化学电源的研究和开发，具有诱人的前景。铝反应时每个原子释放3个电子，而锌、镁仅释放2个，锂释放1个。也就是说要产生相同数量的能量所需要的原料量，铝的最少。因此综合众多因素，铝成为金属空气电池阳极材料的最佳选择。

(2) 铝空气电池的正极活性物质来源于空气中的氧气，其正极是一种透气、不透液、能导电、有催化活性的薄膜，它在整个电池中所占的比例很小，余下的空间可以用来充填阳极材料。因此在现有的小型电池系统中具有最高的比能量。铝空气电池由于空气电极很薄，使得电池很轻巧，适用于便携式设备。

(3) 空气电池可携带燃料长距离行驶，节约能源，元件可快速更换，是电动自行车的理想电源。另外，该电池用在电动自行车上，无毒、无有害气体，可减小因燃油和燃气带来的噪声和排放，对保护环境有利。

(4) 安全可靠，无污染，从生产到使用，从新产品到废品回收，都不会污染环境，更不会燃烧爆炸，堪称绿色能源。

(5) 铝的储量丰富，价格便宜，铝是地球上含量最丰富的金属元素之一，在元素分布上占第三位，全球铝工业储量已超过250亿吨。铝是世界上产量最大，应用最广的金属。

(6) 铝空气电池无需充电，补充铝电极和电解液后即可产生电流。放电曲线平稳，放电时间长，操作方便。

(7) 铝电极的生产工艺和设备比较简单，投资少，研制费用低。可设计成电解液循环和不循环两种结构形式，便于因使用场合不同而进行设计。

虽然铝空气电池含有高的比能量，但比功率较低，充电和放电速度比较缓慢，电压滞后，自放电率较大，需要采用热管理系统来防止铝空气电池工作时的过热。

3. 空气电池在汽车上的应用

空气电池的优点决定了其广阔的应用领域，它主要用于航海中的航标灯、无人观测站、无线电中继站、军事无线电发报机、电力车辆等，利用空气电池一次性使用寿命长的特点，在合理的价格范围内，它也将大量用于移动通信。

由于空气电池有比能量大、质量轻等特点，近几年也在电动汽车上得到应用。电动汽车采用空气电池后，车辆能够明显地提高续驶里程。国外有关资料介绍，美国加利福尼亚州在使用铝空气电池的电动汽车上，有过只更换一次铝电极续驶里程达1600km的记录。我国开发和研制的牵引用动力型铅酸蓄电池的总能量为13.5kW·h，总质量为375kg。而同样能量的铝空气电池总质量仅45kg，为铅酸蓄电池质量的12%。由于电池质量大大减轻，车辆的整备质量也降低，可以提高车辆的载重量或延长续驶里程。

作为面向21世纪的新型能源，空气电池具有容量大、能量高、工作电压平稳等竞争优势，它的出现对我国这样的全球最大电池生产国具有极其重要的意义。

2.7.4 铁电池

目前国内外研究的铁电池有高铁和锂铁两种。

1. 高铁电池的特点

高铁电池是以合成稳定的高铁酸盐(K_2FeO_4、$BaFeO_4$ 等)作为高铁电池的正极材料,来制作能量密度大、体积小、质量轻、寿命长、无污染的新型化学电池,与普通蓄电池相比具有以下优点。

(1) 高能高容量。目前市场上的普通电池比功率只有 60~135W/kg,而高铁电池可以达到 1000W/kg 以上,放电电流是普通电池的 3~10 倍。特别适合需要大功率、大电流的场合。

(2) 性价比高。碱锰电池不能满足目前需大电流大容量用电的数码照相机、摄影机等电子产品的需要,锂离子电池因成本高在此方面不具很强的竞争力。

(3) 放电曲线平坦。如 $Zn-K_2FeO_4$,70%以上的放电时间在 1.2~1.5V。

(4) 原料丰富。地壳中最为丰富的元素为铝和铁,在地壳中,铁含量为 4.75%,锰的含量为 0.088%;铁的用量在自身非常丰富的情况下,仅是锰的 1/3,大大节约了社会资源,降低了原料的成本。

(5) 绿色无污染。高铁酸盐放电后的产物为 FeOOH 或 $Fe_2O_2-H_2O$,无毒无污染,不需要回收。

2. 锂铁电池的特点

锂铁电池主要是磷酸铁电池,开路电压在 1.78~1.83V,工作电压在 1.2~1.5V,比其他一次电池高 0.2~0.4V,而且放电平稳、无污染、安全、性能优良。

磷酸铁锂电池具有以下特点。

(1) 高效率输出。标准放电为 2~5*C*、连续高电流放电可达 10*C*,瞬间脉冲放电(10s)可达 20*C*。

(2) 高温时性能良好。外部温度 65℃时内部温度则高达 95℃,电池放电结束时温度可达 160℃,电池的结构安全、完好。

(3) 当电池内部或外部受到伤害时,电池不燃烧、不爆炸,安全性最好。

(4) 具有很好的循环寿命特性,经 500 次循环,其放电容量仍大于 95%。

(5) 放电到零伏也无损坏。

(6) 可快速充电。

(7) 成本比锂离子电池低。

(8) 对环境无污染。



图 2.36 比亚迪 F6 双模电动汽车使用的铁动力电池

3. 铁电池在汽车上的应用

2008 年,比亚迪股份公司自行研制的 F6 双模电动汽车,使用的动力电池是名为“ET-POWER”的铁动力电池,它是比亚迪在电池领域的最新成果,如图 2.36 所示。

比亚迪股份公司的“铁电池”在“低成本”、“高容量”及“高安全”3 个指标上都取得了实质性突破。该电池采用的是资源丰富、价格低廉铁元素材料,成本低;而材料本身的高比容量及后续的性能设计保证

了此电池与其他常用锂离子电池的能量密度相近；高热稳定性材料的选择和缜密的工艺设计也使该电池通过了系列安全测试，安全性能稳定。此外，它还具有长循环寿命、宽使用温度范围和优异的大电流放电性能等一系列优良特性。从DM双模电动汽车本身来讲，F6DM真正解决了能源问题、安全问题、充电问题和产业化问题，铁电池不仅无污染，无安全隐患，还可以回收；DM双模电动车可以用家用电源进行充电，10min可以快充50%，慢充9h完成。

铁电池技术具有高电压、高能量、无污染等优点，而且目前已开始从实验室走向产品商业化，市场前景不可估量，大力发展铁电池技术对电动汽车产业化进程的推进有着重要而深远的意义。

2.7.5 超级电容器

超级电容器是一种具有超级储电能力、可提供强大脉冲功率的物理二次电源。它是介于蓄电池和传统静电电容器之间的一种新型储能装置。超级电容器主要是利用电极/电解质界面电荷分离所形成的双电层，或借助电极表面快速的氧化还原反应所产生的法拉第准电容来实现电荷和能量的储存的。超级电容器又称双电层电容器、黄金电容、法拉第电容。它是一种电化学元件，在电极与电解液接触面间具有极高的比电容和非常大的接触表面积，但其储能的过程并不发生化学反应，并且这种储能过程是可逆的，因此超级电容器可反复充放电数十万次。

1. 超级电容器的结构

超级电容器单体主要由电极、电解质、集电极、隔离膜连线极柱、密封材料和排气阀等组成。电极一般有碳电极材料、金属氧化物及其水合物电极材料、导电聚合物电极材料，要求电极内阻小、电导率高、表面积大、尽量薄；电解质需有较高导电性(内阻小)和足够电化学稳定性(提高单体电压)，电解质材料分为有机类和无机类，或分为液态和固态类；集电极选用导电性能良好的金属和石墨等来充当，如泡沫镍、镍网(箔)、铝箔、钛网(箔)以及碳纤维等；隔离膜防止超级电容器相邻两电极短路，保证接触电阻较小，尽量薄，通常使用多孔隔膜。有机电解质通常使用聚合物或纸作为隔膜，水溶液电解质可采用玻璃纤维或陶瓷隔膜。

电极的材料、制造技术、电解质的组成和隔离膜质量对超级电容器的性能有较大影响。

图2.37是电动汽车用超级电容器外观图。



图2.37 电动汽车用超级电容器外观图

2. 超级电容器的分类

超级电容器可以按不同的方式进行分类。

(1) 按照储能原理分类。因电荷分离而产生的双电层电容器，欠电位沉积或吸附电容而产生的法拉第准电容器，还有双电层与准电容混合型电容器。

(2) 按照结构形式分类。两电极组成相同且电极反应相同，但反应方向相反，称为对称型；两电极组成不同或反应不同，称为非对称型。

(3) 按照电极材料分类。以活性炭粉末、活性炭纤维、碳气凝胶、纳米碳管、网络结构活性炭为电极材料的超级电容；以贵金属二氧化钌、氧化镍、氧化锰为电极材料的超级



电容；以聚吡咯、聚苯胺、聚对苯等聚合有机物为电极的超级电容。

(4) 按照电解液不同分类。水溶液体系超级电容器，这种电容器电导率高、成本低、分解电压低(1.2V)；有机体系超级电容器，这种电容器电导率低、成本高、分解电压高(3.5V)；固体物电解质超级电容器，这种电容器可靠性高、电导率低、无泄漏、高比能量与薄型化。

3. 超级电容器的特点

(1) 超级电容器的优点。

① 高功率密度。超级电容器的内阻小，输出功率密度高，是一般蓄电池的数十倍。

② 循环寿命长。具有至少十万次以上的充电寿命，没有“记忆效应”。

③ 充电速度快。可以用大电流给超级电容器充电，充电 10s～10min 可达到其额定容量的 95%以上。

④ 工作温度范围宽。能在－40～60℃的环境温度中正常工作。

⑤ 简单方便。充放电线路简单，无须充电电池那样的充电电路，安全系数高，长期使用免维护；检测方便，剩余电量可直接读出。

⑥ 绿色环保。超级电容器在生产过程中不使用重金属和其他有害化学物质，因而在生产、使用、储存以及拆解过程均没有污染，是一种新型的绿色环保电源。

(2) 超级电容器自身存在的缺点。

① 线性放电。超级电容器线性放电的特性使它无法完全放电。

② 低能量密度。目前超级电容器可储存的能量比化学电源少得多。

③ 低电压。超级电容器单体电压低，需要多个电容串联才能提升整体电压。

④ 高自放电。它的自放电速率比化学电源要高。

超级电容器与铅酸蓄电池、普通电容器的性能对比见表 2-7。

表 2-7　三种储能元件性能的对比

性　　能	铅酸蓄电池	超级电容器	普通电容器
充电时间	1～5h	0.3～30s	10^{-6}～10^{-3}s
放电时间	0.3～3h	0.3～30s	10^{-6}～10^{-3}s
比能量/(W·h/kg)	10～100	1～10	<0.1
比功率/(W/kg)	<10^3	<10^4	<10^5
循环寿命/次	10^3	>10^5	>10^5
充放电效率	0.7～0.85	0.85～0.98	>0.95

4. 超级电容器在汽车上的应用

超级电容器自面市以来，全球需求量快速扩大，已成为化学电源领域内新的产业亮点。超级电容器在电动汽车、混合燃料汽车、特殊载重汽车、电力、铁路、通信、国防、消费性电子产品等众多领域有着巨大的应用价值和市场潜力，被世界各国所广泛关注。

美国《探索》杂志 2007 年 1 月号，将超级电容器列为 2006 年世界七大科技发现之一，认为超级电容器是能量储存领域的一项革命性发展，并将在某些领域取代传统蓄电池。



新能源汽车是全球汽车行业重点关注的领域，超级电容器是其要害部件。尽管超级电容器诞生的时间不长，国际上对这项新技术的研究还处于探索阶段，关键性能指标还有待进一步提升。然而，我国却在超级电容公交电车的应用方面领先一步。



图 2.38　由超级电容器做动力的上海市新型公交电车

2006 年 8 月 28 日，上海 11 路超级电容公交电车，即“上海科技登山行动计划超级电容公交电车示范线”投入运营，在实际应用领域走在了世界前列。如图 2.38 所示，该车采用上海奥威科技公司开发的具有完全自主知识产权的超级电容器。因此，国产超级电容器受到了国内外同行的广泛关注。

运营中的超级电容客车，整体布局与申沃柴油客车基本相同。该车起步动作迅速有力，满载时最高速度能达到 50km/h。该车运行时清洁、经济、方便，在车顶上且不太显眼的可伸缩受电弓可快速升降，与专用充电车站上方的高压馈线碰触就可充电。中途充电 30s 即可，总站充电也不过 90s。一次充电可行驶 3.5～8km。一圈跑下来，充一两次电即可，甚至不充电也行。电源并非来自原无轨电车上方的触线，而是便道旁的馈线。该车单车实际耗电每千米 0.88kW·h，比普通无轨电车节能 60%，比设计标准节能 20%。每百千米收益比普通电车提高 70%，经济效益大大高于燃油客车。这种零排放且没有像铅酸蓄电池那样对环境造成二次污染的新能源客车，发展前景十分看好。

尽管目前超级电容客车价格比普通公交车高一些，但随着应用范围的逐步扩大，工艺技术的不断改进，生产成本的日益减少，进入大规模产业化生产阶段后，价格还可以大幅度下降。再者，还可以通过对车重、体积、底盘结构以及各关键部件的匹配进行系统优化，从而进一步降低单车成本。超级电容汽车必将具有更加广阔远大的市场前景。

2.7.6　飞轮电池

飞轮电池是 20 世纪 90 年代才提出的新概念电池，它突破了化学电池的局限，用物理方法实现储能。

1. 飞轮电池的结构与原理

飞轮电池系统由飞轮、电动机、发电机和输入/输出电子装置共同组成，如图 2.39 所示。

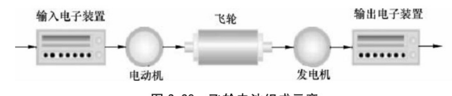


图 2.39　飞轮电池组成示意

飞轮电池通过输入/输出电子装置与外部大功率的电气系统相连，外部系统所传输的能量经由电动机通过提升飞轮的转速将电能转化为机械能储存。当需要向负载输出功率时，飞轮通过发电机再将机械能转化为电能，同时飞轮转速相应降低。由于飞轮电池系统

的能量转换是单线程的，即不可能同时输入、输出能量，为了降低电池系统质量和制造成本，通常将电动机/发动机以及输入/输出电子装置集成在一起。

飞轮储能的关键在于降低机械能的损失，这部分能量的损失主要由空气摩擦阻力和旋转摩擦阻力两部分组成。根据降低空气摩擦阻力方式的不同，可以将飞轮电池分为高速飞轮电池和低速飞轮电池。其中低速飞轮电池通过增加飞轮质量来降低空气摩擦所带来的影响，而高速飞轮电池则通过降低飞轮工作环境的空气压力来降低空气摩擦阻力。此类电池的飞轮受益于新型高强度复合材料的使用而具有重量轻和高转速的特点，其理想工作环境为真空环境，由于技术限制，通常只是将空气摩擦阻力降低至可以接受的程度。为了减小高速旋转时所产生的旋转摩擦阻力，飞轮电池系统通常通过两个磁悬浮轴承的非接触式支承被固定在真空空间内。而高速飞轮电池体积小，适合车载使用。

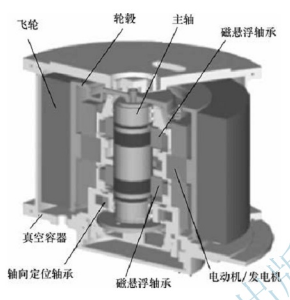


图 2.40　飞轮电池结构

飞轮电池具体结构如图 2.40 所示。它主要由飞轮、轴、轴承、电动机、真空容器和电力电子变换器等部件组成。飞轮是整个电池装置的核心部件，它直接决定了整个装置的储能多少。电力电子变换器通常是由场效应晶体管和绝缘栅极场效应晶体管组成的双向逆变器，它们决定了飞轮装置能量输入/输出量的大小。

2. 电池性能的比较

现在广泛使用的储能电池是基于电化学原理的化学电池，它将电能转变为化学能储存，再转化为电能输出，主要优点是价格低廉，技术成熟。但存在污染严重，效率低下，充电时间长，用电时间短，使用过程中电能不易控制等缺点。

另一种储能电池是超导电池，它把电能转化为磁能储存在超导线圈的磁场中，由于超导状态下线圈没有电阻，所以能量损耗非常小，效率也高，对环境污染也小。但由于超导状态是线圈处于极低温度下才能实现，维持线圈处于超导状态所需要的低温需耗费大量能量，而且维持装置过大，不易小型化，民用的市场前景并不看好。

飞轮电池则兼顾了两者的优点，虽然近阶段的价格较高，但伴随着技术的进步，必将有一个非常广阔的前景。

3 种典型储能电池的性能比较见表 2-8。

表 2-8　3 种典型储能电池的性能比较

性　　能	储 能 电 池		
	化学电池	飞轮电池	超导电池
储能方式	化学能	机械能	超导能
使用寿命/a	3～5	＞20	≈20
技术	成熟	验证	验证

（续表）

性　　能	储 能 电 池		
	化学电池	飞轮电池	超导电池
温度范围	限制	不限	不限
外形尺寸(同功率)	大	最小	中间
储能密度	小	大	大
放能深度	浅	深	深
价格	低	高	较高
环境影响	污染	无污染	无污染

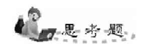
3. 飞轮电池在汽车上的应用

由于技术和材料价格的限制，飞轮电池的价格相对较高，在小型场合还无法体现其优势。但在一些需大型储能装置的场合，使用化学电池的价格也非常昂贵，飞轮电池已得到逐步应用。

飞轮电池充电快，放电完全，非常适合应用于混合能量驱动的车辆中。车辆在正常行驶时和制动时，给飞轮电池充电，飞轮电池则在加速或爬坡时，给车辆提供动力，保证车辆在平稳、性能最优的状态下运行，可减少燃料消耗、空气和噪声污染及发动机的维护，延长发动机的寿命。美国TEXAS大学已研制出汽车用飞轮电池，电池在车辆需要时，可提供150kW的能量，能使满载车辆加速到100km/h。

美国国防部预测未来的战斗车辆在通信、武器和防护系统等方面都广泛需要电能，飞轮电池由于其具有快速的充放电，独立而稳定的能量输出，重量轻，能使车辆工作处于最优状态，减少车辆的噪声，提高车辆的加速性能等优点，已成为美国军方首要考虑的储能装置。

作为一种新兴的储能方式，飞轮电池所拥有传统化学电池无法比拟的优点已被人们广泛认同，它非常符合未来储能技术的发展方向。目前，飞轮电池正在向小型化、低廉化的方向发展。可以预见，伴随着技术和材料学的进步，飞轮电池将在未来的各行各业中发挥重要的作用。



1. 电动汽车用动力电池有哪些类型？
2. 动力电池的性能指标主要有哪些？
3. 电动汽车对动力电池有哪些要求？
4. 电动汽车用蓄电池主要有哪几种？其特点是什么？
5. 燃料电池主要有哪几种？其特点是什么？
6. 太阳能电池主要有哪些类型？其特点是什么？

第 3 章　电动汽车用电动机

电动机是电动汽车驱动系统的核心部件，其性能的好坏直接影响电动汽车驱动系统的性能，特别是影响电动汽车的最高车速、加速性能及爬坡性能等，因此，在开发电动汽车之前初步确定电动机类型及其参数进而对电动机进行选择是至关重要的。

3.1　概　　述

3.1.1　电动机的分类

1. 电动机的分类方法

电动机的分类方法很多，主要有下面几种。

(1) 按工作电源分类。根据电动机工作电源不同，可分为直流电动机和交流电动机。其中，直流电动机又分为绕组励磁式直流电动机和永磁式直流电动机；交流电动机分为单相电动机和三相电动机。

(2) 按结构及工作原理分类。电动机按结构及工作原理可分为直流电动机、异步电动机和同步电动机。直流电动机又分为无刷直流电动机和有刷直流电动机；异步电动机分为感应电动机和交流换向器电动机；同步电动机分为永磁同步电动机、磁阻同步电动机和磁滞同步电动机。

(3) 按用途分类。电动机按用途可分为驱动用电动机和控制用电动机。

(4) 按转子的结构分类。电动机按转子的结构可分为笼型感应电动机和绕线转子感应电动机。

(5) 按运转速度分类。电动机按运转速度可分为高速电动机、低速电动机、恒速电动机、调速电动机。

电动汽车最早采用的是直流电动机。随着电子技术和自动控制技术的发展以及电动汽车技术要求的提高，无刷直流电动机、异步电动机、永磁同步电动机和开关磁阻电动机等显示出比直流电动机更为优越的性能，在电动汽车中应用越来越广泛。

2. 各类电动机介绍

(1) 直流电动机。直流电动机具有起动加速时驱动力大、调速控制简单、技术成熟等优点。但是直流电动机的电枢电流由电刷和换向器引入，换向时产生电火花，换向器容易烧蚀，电刷容易磨损，需经常更换，维护工作量大。接触部分存在磨损，不仅使电动机效率降低，还限制了电动机的工作转速。新研制的电动汽车基本不采用直流电动机。

(2) 无刷直流电动机。无刷直流电动机是一种高性能的电动机。它既有交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等诸多优点，又具备运行效率高、无励磁损耗、运行成本低和调速性能好等特点。因此，它在电动汽车上的应用与日俱增。

(3) 异步电动机。异步电动机在电动汽车上广泛应用，这是因为异步电动机采用变频调速时，可以取消机械变速器，实现无级变速，使传动效率大为提高。另外，异步电动机很容易实现正反转，再生制动能量的回收也更加简单。当采用笼型转子时，异步电动机还具有结构简单、坚固耐用、价格便宜、工作可靠、效率高和免维护等优点。

(4) 永磁同步电动机。永磁同步电动机结构上与无刷直流电动机相似，不同之处在于它采用正弦波驱动，所以在具备无刷直流电动机优点的同时，还具有低噪声、体积小、功率密度大、转动惯量小、脉动转矩小、控制精度高等特点，特别适用于混合动力汽车电动机驱动系统，以达到减小系统体积，改善汽车加速性能和行驶平稳性等目的，因此，永磁同步电动机受到了全世界各大汽车生产厂家的重视。

(5) 开关磁阻电动机。开关磁阻电动机是一种新型电动机，因其结构简单、坚固、工作可靠、效率高，其调速系统运行性能和经济指标比普通的交流调速系统好，具有很大的潜力，被公认是一种极有发展前途的电动汽车驱动电动机。

随着电子技术和计算机技术的飞速发展，新的电动机理论与控制方式层出不穷，正推动着新的电动机驱动技术迅猛发展。高密度、高效率、轻量化、低成本、宽调速牵引电动机驱动系统已成为各国研究和开发的主要热点，如永磁式开关磁阻电动机、转子磁极分割型混合励磁结构同步电动机、永磁无刷交流电动机等。

各种电动机的性能比较见表3-1。

表3-1 各种电动机的性能比较

项　　目	直流电动机	交流电动机	永磁电动机	开关磁阻电动机
转速范围/(r/min)	4000～6000	12000～20000	4000～10000	>15000
功率密度	低	中	高	较高
功率因数		82～85	90～93	60～65
峰值效率/(%)	85～89	94～95	95～97	85～90
负荷效率/(%)	80～87	90～92	85～97	78～86
过载能力/(%)	200	300～500	300	300～500
恒功率区比例		1:5	1:2.25	1:3
电动机质量	重	中	轻	轻
电动机外形尺寸	大	中	小	小
可靠性	一般	好	优良	好
结构坚固性	差	好	一般	优良
控制操作性能	最好	好	好	好
控制器成本	低	高	高	一般

3.1.2 电动机的额定指标

电动机的额定值是根据国家标准以及电动机的设计、试验数据而确定的额定运行数据，是电动机运行的基本依据。电动机的额定指标主要包括以下各项。

（1）额定功率。额定功率是指额定运行情况下轴端输出的机械功率（W 或 kW）。

（2）额定电压。额定电压是指外加于线端的电源线电压（V）。

（3）额定电流。额定电流是指电动机额定运行（额定电压、额定输出功率）情况下电枢绕组（或定子绕组）的线电流（A）。

（4）额定频率。额定频率是指电动机额定运行情况下电枢（或定子侧）的频率（Hz）。

（5）额定转速。额定转速是指电动机额定运行（额定电压、额定频率、额定输出功率）的情况下，电动机转子的转速（r/min）。

当电动机在额定运行情况下输出额定功率时，称为满载运行，这时电动机的运行性能、经济性及可靠性等均处于优良状态。输出功率超过额定功率时称为过载运行，这时电动机的负载电流大于额定电流，将会引起电动机过热，从而缩短电动机使用寿命，严重时甚至烧毁电动机。电动机的输出功率小于额定功率时称为轻载运行，轻载运行时电动机的效率和功率因数等运行性能均较差，因此电动机应尽量避免轻载运行。

3.1.3 电动汽车对电动机的要求

电动汽车在行驶过程中，经常频繁地起动/停车、加速/减速等，这就要求电动汽车中的电动机比一般工业应用的电动机性能更高，基本要求如下：

（1）电动机的运行特性要满足电动汽车的要求，在恒转矩区，要求低速运行时具有大转矩，以满足电动汽车起动和爬坡的要求；在恒功率区，要求低转矩时具有高的速度，以满足电动汽车在平坦的路面能够高速行驶的要求。

（2）电动机应具有瞬时功率大、带负载起动性能好、过载能力强、加速性能好、使用寿命长等特点。

（3）电动机应在整个运行范围内，具有很高的效率，以提高一次充电的续驶里程。

（4）电动机应能够在汽车减速时实现再生制动，将能量回收并反馈给蓄电池，使得电动汽车具有最佳能量的利用率。

（5）电动机应可靠性好，能够在较恶劣的环境下长期工作。

（6）电动机应体积小，质量轻，一般为工业用电动机的 1/3～1/2。

（7）电动机的结构要简单坚固，适合批量生产，便于使用和维护。

（8）价格便宜，从而能够减少整体电动汽车的价格，提高性价比。

（9）运行时噪声低，减少污染。

3.2 直流电动机

直流电动机就是将直流电能转换成机械能的电动机，是电动机的主要类型之一，具有结构简单、技术成熟、控制容易等特点，在早期的电动汽车或希望获得更简单结构的电动汽车中得到应用，特别是场地用电动车和专用电动车上应用更为普遍。

3.2.1 直流电动机的分类

直流电动机分为绕组励磁式直流电动机和永磁式直流电动机。在电动汽车所采用的直流电动机中，小功率电动机采用的是永磁式直流电动机，大功率电动机采用的是绕组励磁

式直流电动机。

绕组励磁式直流电动机根据励磁方式的不同，可分为他励式、并励式、串励式和复励式 4 种类型。

1. 他励式直流电动机

他励式直流电动机的励磁绕组与电枢绕组无连接关系，而由其他直流电源对励磁绕组供电。因此励磁电流不受电枢端电压或电枢电流的影响。永磁直流电动机也可看作他励直流电动机。

他励直流电动机在运行过程中励磁磁场稳定而且容易控制，容易实现电动汽车的再生制动要求。但当采用永磁激励时，虽然电动机效率高，重量轻和体积较小，但由于励磁磁场固定，电动机的机械特性不理想，驱动电动机产生不了足够大的输出转矩来满足电动汽车起动和加速时的大转矩要求。

2. 并励直流电动机

并励直流电动机的励磁绕组与电枢绕组相并联，共用同一电源，性能与他励直流电动机基本相同。并励绕组两端电压就是电枢两端电压，但是励磁绕组用细导线绕成，其匝数很多，因此具有较大的电阻，使得通过它的励磁电流较小。

3. 串励直流电动机

串励直流电动机的励磁绕组与电枢绕组串联后，再接于直流电源，这种直流电动机的励磁电流就是电枢电流。这种电动机内磁场随着电枢电流的改变有显著的变化。为了使励磁绕组中不致引起大的损耗和电压降，励磁绕组的电阻越小越好，所以串励直流电动机通常用较粗的导线绕成，它的匝数较少。

串励直流电动机在低速运行时，能给电动汽车提供足够大的转矩，而在高速运行时，电动机电枢中的反电动势增大，与电枢串联的励磁绕组中的励磁电流减小，电动机高速时的弱磁调速功能易于实现，因此串励直流电动机驱动系统能较好地符合电动汽车的特性要求。但串励直流电动机由低速到高速运行时弱磁调速特性不理想，随着电动汽车行驶速度的提高，驱动电动机输出转矩快速减小，不能满足电动汽车高速行驶时由于风阻大而需要输出较大转矩的要求。串励直流电动机运行效率低；在实现电动汽车的再生制动时，由于没有稳定的励磁磁场，再生制动的稳定性差；另外由于再生制动需要加接触器切换，使得驱动电动机控制系统的故障率较高，可靠性较差。另外，串励电动机的励磁绕组损耗大，体积和重量也较大。

4. 复励直流电动机

复励直流电动机有并励和串励两个励磁绕组，电动机的磁通由两个绕组内的励磁电流产生。若串励绕组产生的磁通量与并励绕组产生的磁通量方向相同称为积复励。若两个磁通量方向相反，则称为差复励。

复励直流电动机的永磁励磁部分采用高磁性钕铁硼材料，运行效率高。由于电动机永磁励磁部分有稳定的磁场，因此用该类电动机构成驱动系统时易实现再生制动功能。同时由于电动机增加了增磁绕组，通过控制励磁绕组的励磁电流或励磁磁场的大小，能克服纯永磁他励直流电动机不能产生足够的输出转矩这种缺陷以满足电动汽车低速或爬坡时的大



转矩要求，而电动机的质量或体积比串励电动机的还要小。

各种励磁方式直流电动机的电路如图 3.1 所示。图中：I_a 为电枢电流；I_f 为励磁电流；U 为电源电压；U_f 为励磁电压；I 为负载电流。

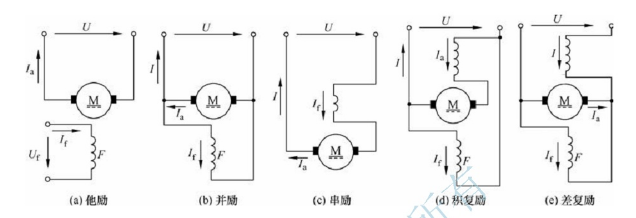


图 3.1　各种励磁方式直流电动机的电路

电动汽车所使用的直流电动机主要是他励直流电动机(包括永磁直流电动机)、串励直流电动机、复励直流电动机 3 种类型。

小功率(0.1～10kW)的电动机采用的是小型高效的永磁直流电动机，可以应用在小型、低速的搬运设备上。如电动自行车、休闲用电动汽车、高尔夫球车、电动叉车等。

中等功率(10～100kW)的电动机采用他励、复励或串励式直流电动机，可以用于结构简单、转矩要求较大的电动货车上。

大功率(>100kW)直流电动机采用串励式，可用在要求低速、高转矩的专用电动车上，如矿石搬运电动车、玻璃电动搬运车等。

3.2.2　直流电动机的结构与特点

1. 直流电动机的结构

直流电动机由定子与转子两大部分构成，定子和转子之间的间隙称为气隙，如图 3.2 所示。

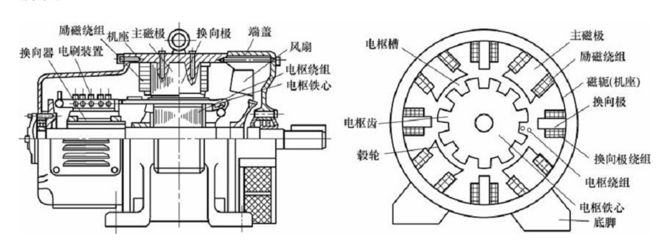


图 3.2　直流电动机的结构

(1) 定子部分。直流电动机定子主要由主磁极、机座、换向极和电刷装置等组成。

① 主磁极。主磁极的作用是建立主磁场，它由主极铁心和套装在铁心上的励磁绕组构成。主极铁心一般由1～1.5mm的低碳钢板冲压一定形状叠装固定而成，是主磁路的一部分。励磁绕组用扁铜线或圆铜线绕制而成，产生励磁磁动势。

② 机座。机座用铸钢或厚钢板焊接而成，它既是主磁路的一部分，又是电动机的结构框架。

③ 换向极。换向极的作用是改善直流电动机的换向性能，使直流电动机运行时不产生有害的火花。它由换向极铁心和套装在铁心上的换向极绕组构成。

④ 电刷装置。电刷装置由电刷、刷握、刷杆、汇流排等组成，用于电枢电路的引入或引出。

(2) 转子部分。转子部分包括电枢铁心、电枢绕组、换向器等。

① 电枢铁心。电枢铁心既是主磁路的组成部分，又是电枢绕组的支撑部分。电枢绕组嵌放在电枢铁心的槽内。电枢铁心一般用0.55mm硅钢冲片叠压而成。

② 电枢绕组。电枢绕组由扁铜线或圆铜线按一定规律绕制而成，它是直流电动机的电路部分，也是产生电动势和电磁转矩进行机电能量转换的部分。

③ 换向器。换向器由冷拉梯形铜排和绝缘材料等构成，用于电枢电流的换向。

2. 直流电动机的特点

直流电动机具有以下特点。

(1) 调速性能好。直流电动机可以在重负载条件下，实现均匀、平滑的无级调速，而且调速范围较宽。

(2) 起动力矩大。可以均匀而经济地实现转速调节，因此，凡是在重负载下起动或要求均匀调节转速的机械，例如大型可逆轧钢机、卷扬机、电力机车、电车等，都可用直流电动机拖动。

(3) 控制比较简单。一般用斩波器控制，它具有高效率、控制灵活、质量轻、体积小、响应快等优点。

(4) 有易损件。由于存在电刷、换向器等易磨损器件，所以必须进行定期维护或更换。

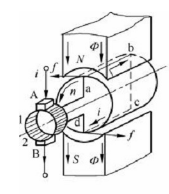
电动汽车专用的直流电动机和其他通用的电动机相比，应在耐高温性、抗振动性、低损耗性、抗负载波动性以及小型轻量化、免维护性等方面给予特殊考虑。

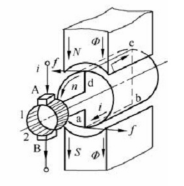
除此之外，电动汽车用直流电动机大多在较低的电压下驱动，同时是大电流电路，因此需要注意连接接线的接触电阻。

3.2.3 直流电动机的工作原理

图3.3所示为直流电动机的工作原理示意图。图中，定子有一对N、S极，电枢绕组的末端分别接到两个换向片上，正、负电刷A和B分别与两个换向片接触。

如果给两个电刷加上直流电源，如图3.3(a)所示，则有直流电流从电刷A流入，经过线圈abcd，从电刷B流出。根据电磁力定律，载流导体ab和cd受到电磁力的作用，其方向可用左手定则判定，两段导体受到的力形成了一个转矩，使得转子逆时针转动。如果转子转到图3.3(b)所示的位置，电刷A和换向片2接触，电刷B和换向片1接触，直流





(a) 导体ab处于N极下　　(b) 导体ab处于S极下

图 3.3　直流电动机的工作原理示意图

电流从电刷 A 流入，在线圈中的流动方向是 dcba，从电刷 B 流出。此时载流导体 ab 和 cd 受到电磁力的作用方向同样可用左手定则判定，它们产生的转矩仍然使得转子逆时针转动。这就是直流电动机的工作原理。

外加的电源是直流的，但由于电刷和换向片的作用，在线圈中流过的电流是交流的，其产生的转矩的方向却是不变的。

3.2.4　直流电动机的基本方程

1. 电枢绕组的感应电动势

直流电动机电枢绕组的感应电动势是指从一对正负电刷引出的电动势，也称电枢电动势，可表示为

$$E_a = C_e \Phi n \tag{3-1}$$

式中，E_a 为电枢感应电动势；C_e 为电动势常数，与电动机结构有关；Φ 为每极磁通量；n 为电动机转速。

2. 直流电动机的电磁转矩

直流电动机的电磁转矩是指电枢上所有载流导体在磁场中受力所形成的转矩的总和，可表示为

$$T_e = C_T \Phi I_a \tag{3-2}$$

式中，T_e 为电磁转矩；C_T 为转矩常数，与电动机结构有关；I_a 为电枢电流。

直流电动机的基本方程式与励磁方式有关，励磁方式不同，基本方程式略有差别。下面以他励直流电动机为基础建立电压方程、转矩方程和功率方程。

3. 电压方程式

根据他励直流电动机的等效电路，可以得到电枢回路的电压方程为

$$\begin{aligned} U_a &= E_a + I_a R_a \\ E_a &= \omega_m M I_f \end{aligned} \tag{3-3}$$

式中，U_a 为电枢电压；E_a 为电枢感应电动势；R_a 为电枢电阻；ω_m 为电枢角速度；M 为互感；I_f 为励磁电流。

励磁回路的电压方程为

$$U_f = I_f R_f \tag{3-4}$$

式中，U_f 为励磁电压；R_f 为励磁电阻。

根据式(3-3)和式(3-4)，可以得出以下结论：

(1) 对于永磁直流电动机，有 $I_f M = \Phi$；

(2) 对于并励直流电动机，有 $U_f = U_a = U$，$I_f + I_a = I$；

(3) 对于串励直流电动机，有 $U_f + U_a = U$，$I_f = I_a = I$；

(4) 对于复励直流电动机，其特性介于串励和并励之间。

4. 转矩方程式

电动机空载时，轴上输出转矩 $T_2 = 0$，则有 $T_e = T_0$。

当负载转矩为 T_L，轴上输出有 $T_2 = T_L$，电动机匀速稳定运行时有

$$T_e = T_2 + T_0 \tag{3-5}$$

式中，T_e 为电磁转矩，为拖动性质转矩；T_0 为空载转矩，它是由电动机的机械摩擦和铁耗引起的转矩；$(T_2 + T_0)$ 为总的制动转矩，方向与 T_e 相反。

电磁转矩为

$$T_e = M I_f I_a \tag{3-6}$$

根据式(3-3)～式(3-6)，可以得到各种直流电动机的速度转矩特性曲线，如图 3.4 所示。

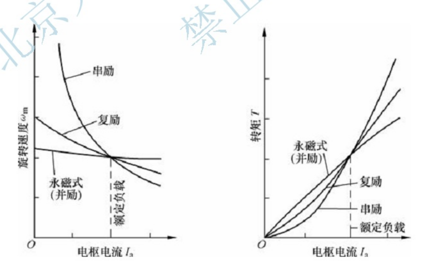


图 3.4　各种直流电动机的速度转矩特性

由式(3-3)可得电枢角速度为

$$\omega_m = \frac{U_a - R_a I_a}{M I_f} \tag{3-7}$$

从式(3-7)可以看出，通过调整励磁电流实现对转速的大幅度控制。



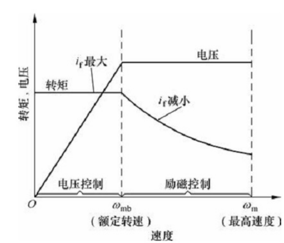


图 3.5 直流电动机的转速-转矩、电压特性曲线

对于串励直流电动机，有 $T_e=MI_a^2$，所以大电流通过时会产生非常大的转矩，如果电流变小，由式(3-7)可知，转速也将大幅度上升，由此可以得到电动汽车所希望的特性。

图 3.5 为直流电动机的转速-转矩、电压特性曲线。

5. 功率方程式

他励直流电动机输入功率为

$$P_1=UI_a=I_a(E_a+I_aR_a)=E_aI_a+I_a^2R_a=P_{em}+P_{cu\,a} \tag{3-8}$$

式中，P_1 为输入功率；P_{em} 为电磁功率；$P_{cu\,a}$ 为电枢回路上的铜耗。

3.2.5 直流电动机的运行特性

直流电动机的运行特性主要包括直流电动机的工作特性和直流电动机的机械特性。

直流电动机的工作特性是指电动机的转速特性、转矩特性和效率特性，即在保持额定电压、额定励磁电流(他励、并励)或励磁调节不变(串励、复励)的情况下，电动机的转速、电磁转矩和效率随电枢电流(或输出功率)变化的特性。

直流电动机的机械特性是指在电源电压恒定、励磁调节电阻和电枢回路电阻不变的情况下，其转速与电磁转矩之间的关系，又称为转矩-转速特性，是电动机的重要特性。

不同励磁方式直流电动机的运行特性是不同的，现分别予以介绍。

1. 并励(他励)直流电动机的运行特性

(1) 转速特性。并励(他励)直流电动机的转速特性为

$$n=\frac{U-R_aI_a}{C_e\Phi}=n_0-\Delta n \tag{3-9}$$

式中，$n_0=\frac{U}{C_e\Phi}$为电动机的理想空载转速；$\Delta n=\frac{R_aI_a}{C_e\Phi}$为转速调整率，由电枢电阻压降引起，一般为3%～8%。

并励(他励)直流电动机在运行时，励磁绕组绝对不能断开。若励磁电流为零，电枢电流迅速增大，若负载较小，则会造成“飞车”事故。

(2) 转矩特性。并励直流电动机的转矩特性可表示为

$$T_e=C_T\Phi I_a=C_T\Phi(I+I_f) \tag{3-10}$$

式中，I 为负载电流；I_f 为励磁电流。

如果忽略电枢反应，则转矩特性是一条过原点的直线。

(3) 效率特性。直流电动机的效率特性可表示为

$$\eta=\frac{P_2}{P_1}\times100\%=\frac{P_2}{P_2+P_b+P_k}\times100\% \tag{3-11}$$

式中，P_b 为直流电动机的不变损耗，与负载电流变化无关；P_k 为直流电动机的可变损耗，随负载电流二次方变化。

直流电动机的效率具有普遍意义。电动机的额定效率是指电动机额定运行时的效率。一般直流电动机的效率为 75％～85％。

并励直流电动机的工作特性如图 3.6 所示。

(4) 机械特性。并励(他励)直流电动机的机械特性可表示为

$$n=\frac{U}{C_e\Phi}-\frac{R_a+R_J}{C_eC_T\Phi^2}T_e \tag{3-12}$$

式中，R_J 为电枢回路外的串联电阻。

根据式(3－12)可以得到并励(他励)直流电动机的机械特性曲线，即改变电枢电压、改变励磁电流、改变电枢回路电阻时的机械特性曲线，如图 3.7～图 3.9 所示。

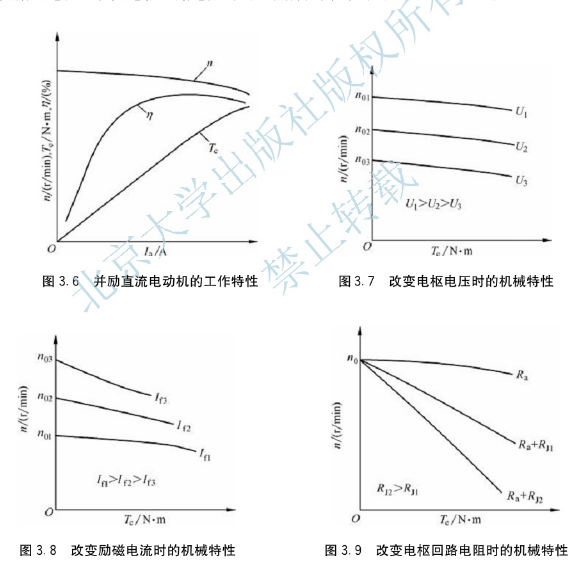


图 3.6　并励直流电动机的工作特性

图 3.7　改变电枢电压时的机械特性

图 3.8　改变励磁电流时的机械特性

图 3.9　改变电枢回路电阻时的机械特性

从图 3.7 可以看出，逐渐减小电源电压时，理想空载转速逐渐下降，但从空载到满载转速变化很小，这种特性称为硬机械特性。这使并励和他励直流电动机具有优良的调速性能。

从图 3.8 可以看出，逐渐减小励磁电流时，理想空载转速逐渐上升，曲线斜率逐渐增大，使特性变软，电动机运行的稳定性变差。过分“弱磁”时，使电动机转速过高，甚至引起“飞车”。因此，电动机采用弱磁调节时必须注意。

从图 3.9 可以看出，当电枢回路电阻从零逐渐开始增大时，机械特性曲线的斜率逐渐增大，使特性逐渐变软，但电动机的理想空载转速不变。

2. 串励直流电动机的运行特性

串励直流电动机广泛应用于交通运输中，它的特点是负载电流、电枢电流和励磁电流是一个电流，即 $I=I_a=I_f$，气隙主磁通随电枢电流的变化而变化，同时对电动机转速产生较大影响。

(1) 转速特性。串励直流电动机的转速特性可表示为

$$n=\frac{U-(R_a+R_f)I}{C_e\Phi} \tag{3-13}$$

(2) 转矩特性。串励直流电动机的转矩特性可表示为

$$T_e=C_T\Phi I \tag{3-14}$$

串励直流电动机的工作特性曲线如图 3.10 所示。从转矩特性可以看出，当负载增加时，串励直流电动机的转矩快速增加，但与此同时转速也快速下降，因此基本保持了功率恒定，即串励直流电动机具有恒功率特性。

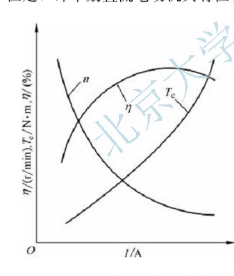


图 3.10 串励直流电动机的工作特性曲线

(3) 机械特性。串励直流电动机的机械特性可表示为

$$n=\frac{1}{C_eK_f}\left(\sqrt{\frac{C_TK_f}{T_e}}U-R_a-R_f\right) \tag{3-15}$$

根据式(3-15)，可以得到串励直流电动机的机械特性曲线，如图 3.11～图 3.12 所示。

由于串励电动机的负载电流、电枢电流和励磁电流相等，所以调节电源电压或电枢回路电阻的同时，励磁电流也随之变化。

从图 3.11～图 3.12 可以看出，转速随转矩的增加迅速下降，这种特性称为软机械特性。

串励直流电动机具有恒功率特性、起动转矩大以及调速性能优良等特点，在电力机车、城市电车、特种电动车等交通工具上得到广泛应用。

3. 复励直流电动机的运行特性

复励电动机既有并励绕组，又有串励绕组，因此其特性介于并励电动机和串励电动机之间。当复励电动机以并励为主时，其特性接近于并励电动机；当复励电动机以串励为主时，其特性接近于串励电动机。

3.2.6 直流电动机的控制

从直流电动机的转速特性和机械特性可以看出，其转速控制方法主要有电枢调压控

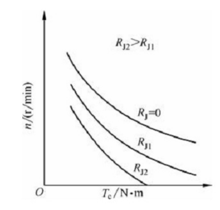


图 3.11 改变电枢回路电阻时的机械特性

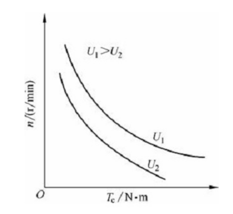


图 3.12 改变电枢电压时的机械特性

制、磁场控制和电枢回路串电阻控制。

1. 电枢调压控制

电枢调压控制是指通过改变电枢的端电压来控制电动机的转速。他励电动机改变电枢端电压时的转速控制特性如图 3.13 所示。

电枢调压控制只适合电动机基速以下的转速控制，它可保持电动机的负载转矩不变，电动机转速近似与电枢端电压成比例变化，所以称其为恒转矩调速。

直流电动机采用电枢调压控制可实现在宽广范围内的连续平滑的速度控制，调速比一般可达 1∶10，如果与磁场控制配合使用，调速比可达 1∶30。

电枢调压控制需要专用的可控直流电源，过去常用电动机-发电机组，现在大、中容量的可控直流电源广泛采用晶闸管可控整流电源，小容量则采用电力晶体管的 PWM 控制电源，电动汽车用的直流电动机常用斩波控制器作为电枢调压控制电源。

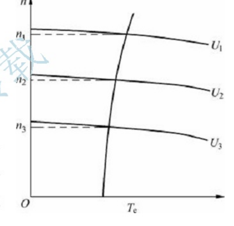


图 3.13 改变电枢端电压时的转速控制特性

电枢调压控制的调速过程：当磁通保持不变时，减小电压，由于转速不立即发生变化，反电动势也暂时不变化，同时由于电枢电流减小了，转矩也减小了。如果阻转矩未变，则转速下降。随着转速的降低，反电动势减小，电枢电流和转矩就随着增大，直到转矩与阻转矩再次平衡为止，但这时转速已经较原来降低了。

2. 磁场控制

磁场控制是指通过调节直流电动机的励磁电流改变每极磁通量，从而调节电动机的转速。他励电动机带恒转矩负载时磁场控制的转速控制特性如图 3.14 所示。

磁场控制只适合电动机基数以上的控制。当电枢电流不变时，具有恒功率调速特性。磁场控制效率高，但调速范围小，一般不超过 1∶3，而且响应速度较慢。

磁场控制可采用可变电阻器，也可采用可控整流电源作为励磁电源。

磁场控制的调速过程：当电压保持恒定时，减小磁通，由于机械惯性作用，转速不立

即发生变化，于是反电动势减小，电枢电流随之增加。由于电枢电流增加的影响超过磁通减小的影响，所以转矩也就增加。如果阻转矩未变，则转速上升。随着转速的升高，反电动势增大，电枢电流和转矩也随着减小，直到转矩和阻转矩再次平衡为止，但这时转速已经较原来升高了。

3. 电枢回路串电阻控制

电枢回路串电阻控制是指当电动机的励磁电流不变时，通过改变电枢回路电阻来调节电动机的转速。其转速控制特性如图 3.15 所示。

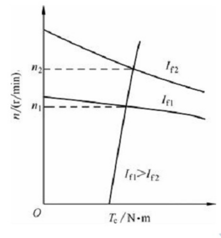


图 3.14 磁场控制时的转速控制特性

图 3.15 电枢回路串电阻时的转速控制特性

这种控制方法的机械特性较软，而且电动机运行不稳定，一般很少应用。对于小型串励电动机，则常采用这种电枢回路串电阻控制方式。

3.3 无刷直流电动机

无刷直流电动机是用电子换向装置代替了有刷直流电动机的机械换向装置，保留了有刷直流电动机宽阔而平滑的优良调速性能，克服了有刷直流电动机机械换向带来的一系列的缺点，体积小，质量轻，可做成各种体积形状，高效率，高转矩，高精度，数字式控制，是最理想的调速电动机之一，在电动汽车上有着广泛的应用前景。

3.3.1 无刷直流电动机的分类

无刷直流电动机按照工作特性，可以分为具有直流电动机特性的无刷直流电动机和具有交流电动机特性的无刷直流电动机。

1. 具有直流电动机特性的无刷直流电动机

具有直流电动机特性的无刷直流电动机，反电动势波形和供电电流波形都是矩形波，所以又称为矩形波同步电动机。这类电动机由直流电源供电，借助位置传感器来检测主转子的位置，由所检测出的信号去触发相应的电子换相线路以实现无接触式换相。显然，这种无刷直流电动机具有有刷直流电动机的各种运行特性。

2. 具有交流电动机特性的无刷直流电动机

具有交流电动机特性的无刷直流电动机，反电动势波形和供电电流波形都是正弦波，所以又称为正弦波同步电动机。这类电动机也由直流电源供电，但通过逆变器将直流电变换成交流电，然后去驱动一般的同步电动机。因此，它们具有同步电动机的各种运行特性。

下面介绍的无刷直流电动机主要是指具有直流电动机特性的无刷直流电动机。

3.3.2 无刷直流电动机结构与特点

1. 无刷直流电动机的结构

无刷直流电动机主要由电动机本体、电子换相器和转子位置传感器 3 部分组成。

(1) 电动机本体。无刷直流电动机的电动机本体由定子和转子两部分组成。

定子是电动机本体的静止部分，它由导磁的定子铁心、导电的电枢绕组及固定铁心和绕组用的一些零部件、绝缘材料、引出部分等组成，如机壳、绝缘片、槽锲、引出线及环氧树脂等。

转子是电动机本体的转动部分，是产生励磁磁场的部件，由永磁体、导磁体和支撑零部件组成。

(2) 电子换相器。电子换相器由功率开关和位置信号处理电路构成，主要用来控制定子各绕组通电的顺序和时间。无刷直流电动机本质上是自控同步电动机，电动机转子跟随定子旋转磁场运动，因此，应按一定的顺序给定子各相绕组轮流通电，使之产生旋转的定子磁场。无刷直流电动机的三相绕组中通过的电流是 120°电角度的方波，绕组在持续通过恒定电流的时间内产生的定子磁场在空间是静止不动的。而在开关换相期间，随着电流从一相转移到另一相，定子磁场随之跳跃了一个电角度。而转子磁场则随着转子连续旋转。这两个磁场的瞬时速度不同，但是平均速度相等，因此能保持“同步”。无刷直流电动机由于采用了自控式逆变器即电子换相器，电动机输入电流的频率和电动机转速始终保持同步，电动机和逆变器不会产生振荡和失步，这也是无刷直流电动机的优点之一。

一般来说，对电子换向器的基本要求是：结构简单；运行稳定可靠；体积小，质量轻；功耗小；能按照位置传感器的信号进行正确换向，并能控制电动机的正反转；应能长期满足不同环境条件的要求。

(3) 位置传感器。位置传感器在无刷直流电动机中起着检测转子磁极位置的作用，为功率开关电路提供正确的换相信息，即将转子磁极的位置信号转换成电信号，经位置信号处理电路处理后控制定子绕组换相。由于功率开关的导通顺序与转子转角同步，因而位置传感器与功率开关一起，起着与传统有刷直流电动机的机械换向器和电刷相类似的作用。位置传感器的种类比较多，可分为电磁式位置传感器、光电式位置传感器、磁敏式位置传感器等。电磁式传感器具有输出信号大、工作可靠、寿命长等优点，但其体积比较大，信噪比较低且输出为交流信号，需整流滤波后才能使用。光电式位置传感器性能比较稳定，体积小、质量轻，但对环境要求较高。磁敏式位置传感器的基本原理为霍尔效应和磁阻效应式，对环境适应性很强，成本低廉，但精度不高。

图 3.16 是某无刷直流电动机实物图。

2. 无刷直流电动机的特点

无刷直流电动机作为电动汽车用电动机，具有以下优点：

(1) 外特性好，非常符合电动汽车的负载特性，尤其是具有低速大转矩特性，能够提供大的起动转矩，满足电动汽车的加速要求。

(2) 可以在低、中、高宽速度范围内运行，而有刷电动机由于受机械换向的影响，只能在中低速下运行。

(3) 效率高，尤其是在轻载车况下，仍能保持较高的效率，这对保存珍贵的电池能量是很重要的。

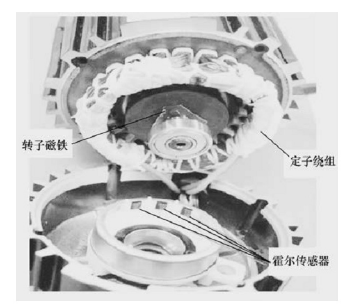


图 3.16 无刷直流电动机实物图

(4) 过载能力强，比 Y 系列电动机可提高过载能力两倍以上，可满足电动汽车的突起堵转需要。

(5) 再生制动效果好，因无刷直流电动机转子具有很高的永久磁场，在汽车下坡或制动时电动机可完全进入发电机状态，给电池充电，同时起到电制动作用，减轻机械制动负担。

(6) 体积小、质量轻、比功率大，可有效地减轻质量、节省空间。

(7) 无机械换向器，采用全封闭式结构，防止尘土进入电动机内部，可靠性高。

(8) 控制系统比异步电动机简单。

缺点是电动机本身比交流电动机复杂，控制器比有刷直流电动机复杂。

3.3.3 无刷直流电动机的工作原理

无刷直流电动机的工作原理与有刷直流电动机的工作原理基本相同。它是利用电动机转子位置传感器输出信号控制电子换向线路去驱动逆变器的功率开关器件，使电枢绕组依次馈电，从而在定子上产生跳跃式的旋转磁场，拖动电动机转子旋转。同时，随着电动机转子的转动，转子位置传感器又不断送出位置信号，不断地改变电枢绕组的通电状态，使得在某一磁极下导体中的电流方向保持不变，这样电动机就旋转起来了。

图 3.17 所示为无刷直流电动机的工作原理图。

3.3.4 无刷直流电动机的数学模型

无刷直流电动机的基本物理量有电磁转矩、电枢电流、电动势和转速等。这些物理量的表达式与电动机气隙磁场分布、绕组形式有密切关系。下面以两相导通星型三相六状态为例，分析无刷直流电动机的电磁转矩、电枢电流和电动势等特性。为了便于分析，不考虑开关管的开关动作的过渡和电枢绕组的电感。

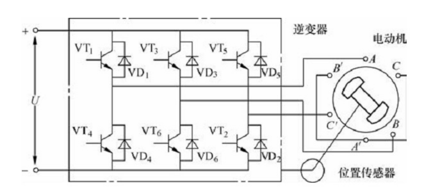


图 3.17 无刷直流电动机的工作原理图

1. 电枢绕组感应电动势

单根导体在气隙磁场的感应电动势为

$$e=B_{\sigma}Lv \tag{3-16}$$

式中，B_{σ} 为气隙磁感应强度；L 为导体有效长度；v 为导体相对于磁场的线速度。

导体相对于磁场的线速度为

$$v=\frac{\pi D}{60}n=p\tau\frac{n}{30} \tag{3-17}$$

式中，n 为电动机转速；D 为电枢内径；τ 为极距；p 为极对数。

设电枢绕组每相串联匝数为 W_{Φ}，则每相绕组的感应电动势为

$$E_{\Phi}=2W_{\Phi}e \tag{3-18}$$

方波气隙磁感应强度对应的每极磁通为

$$\Phi=B_{\sigma}a_{i}\tau L \tag{3-19}$$

式中，a_i 为计算极弧系数。

则有

$$e=p\Phi\frac{n}{30a_i} \tag{3-20}$$

每相绕组感应电动势为

$$E_{\Phi}=\frac{p}{15a_i}W_{\Phi}\Phi n \tag{3-21}$$

电枢感应电动势为

$$E=2E_{\Phi}=\frac{2p}{15a_i}W_{\Phi}\Phi n=C_{e}\Phi n \tag{3-22}$$

式中，$C_e=\frac{2p}{15a_i}W_{\Phi}$为电动势常数。

2. 电枢电流

在每个导通时间内，电压平衡方程式为

$$U-2\Delta U=E+2I_{a}R_{a} \tag{3-23}$$

式中，U 为电源电压；ΔU 为开关管的饱和压降；I_a 为每相绕组的电流；R_a 为每相绕组的电阻。

电枢电流为

$$I_a=\frac{U-2\Delta U-E}{2R_a} \tag{3-24}$$

3. 电磁转矩

在任一时刻，电动机的电磁转矩 T_e 均由两相绕组的合成磁场与转子永磁场相互作用而产生，则

$$T_e=\frac{2E_{\Phi}I_a}{\omega}=\frac{EI_a}{\omega} \tag{3-25}$$

式中，$\omega=\frac{\pi n}{30}$为电动机的角速度。

则电磁转矩为

$$T_e=C_T\Phi I_a \tag{3-26}$$

式中，$C_T=\frac{4p}{\pi a_i}W_{\Phi}$为转矩常数。

4. 转速

电动机转速为

$$n=\frac{U-2\Delta U-2I_aR_a}{C_e\Phi} \tag{3-27}$$

5. 无刷直流电动机的数学模型

由于无刷直流电动机的气隙磁场、反电动势以及电流是非正弦的，因此采用直交轴坐标变换已不是有效的方法。通常，直接利用电动机本身的相变量来建立数学模型。该方法既简单又具有较好的准确度。

为简化分析，建立无刷直流电动机数学模型时，假设以下条件成立：

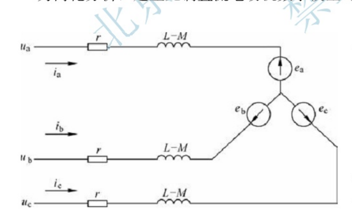


图 3.18　无刷直流电动机等效电路

(1) 电动机定子绕组为三项Y接法，三相绕组完全对称；

(2) 转子磁钢的磁性能一致；

(3) 三相反电动势波形完全一致；

(4) 三相定子绕组的电阻、电感相同，且不受电流变化的影响；

(5) 磁路不饱和，不计涡流损耗和磁滞损耗，不计定子斜槽的影响，不计电枢反应。

无刷直流电动机的等效电路如图 3.18 所示。

1) 电压方程

根据无刷直流电动机的等效电路图，可以得到三相绕组的电压平衡方程式为

$$\begin{bmatrix}u_a\\u_b\\u_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r&0&0\\0&r&0\\0&0&r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L&M&M\\M&L&M\\M&M&L\end{bmatrix}P\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}e_a\\e_b\\e_c\end{bmatrix} \tag{3-28}$$

式中，u_a、u_b、u_c 为定子相绕组电压；i_a、i_b、i_c 为定子相绕组相电流；e_a、e_b、e_c 为定子

相绕组电动势；r 为每相绕组的电阻；L 为每相绕组的自感；M 为每两相绕组间的互感；P 为微分算子 $P=\mathrm{d}/\mathrm{d}t$。

由于转子磁阻不随转子位置变化而变化，因而定子绕组的自感和互感为常数。

当三相绕组为Y连接，且没有中线时，则有

$$i_a+i_b+i_c=0 \tag{3-29}$$

并且

$$Mi_a+Mi_b=-Mi_c \tag{3-30}$$

由此得到电压方程为

$$\begin{bmatrix}u_a\\u_b\\u_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r&0&0\\0&r&0\\0&0&r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L-M&0&0\\0&L-M&0\\0&0&L-M\end{bmatrix}P\begin{bmatrix}i_a\\i_b\\i_c\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}e_a\\e_b\\e_c\end{bmatrix} \tag{3-31}$$

2）电磁转矩方程

无刷直流电动机的电磁转矩方程与普通直流电动机相似，其电磁转矩大小与磁通和电流幅值成正比，即

$$T_e=\frac{1}{\omega}(e_a i_a+e_b i_b+e_c i_c) \tag{3-32}$$

为产生恒定的电磁转矩，要求定子电流为方波，反电动势为梯形波，且在每半个周期内，方波电流的持续时间为120°电角度，梯形波的反电动势的平顶部分也要持续120°电角度以上，二者应严格同步。在理想情况下，任何时刻定子绕组只有两相导通，且每一相电流和反电动势数值完全相等方向完全相反，则电磁功率为

$$P_e=p(e_a i_a+e_b i_b+e_c i_c)=2pe_s i_s \tag{3-33}$$

式中，e_s 为定子绕组各相电动势的幅值；i_s 为定子绕组各相电流的幅值。

电磁转矩又可写成：

$$T_e=\frac{P_e}{\omega}=\frac{2pe_s i_s}{\omega} \tag{3-34}$$

无刷直流电动机通电期间，带电导体处于相同的磁感应强度下，电枢每相绕组的感应电动势为

$$e_s=\frac{pN}{60}\Phi n=K_e\Phi n \tag{3-35}$$

式中，N 为电枢绕组每相串联导体数；K_e 为电动势系数。

因此，电磁转矩可表示为

$$T_e=\frac{60}{\pi}K_e\Phi i_s=K_T\Phi i_s \tag{3-36}$$

式中，K_T 为转矩系数。

3）运动方程

在忽略转动时的黏滞系数的情况下，无刷直流电动机的运动方程可写为

$$T_e-T_L=J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{3-37}$$

式中，T_e 为发动机的额定转矩；T_L 为负载转矩；J 为电动机轴上转动惯量的总和。

4）机械特性

无刷直流电动机的机械特性为

$$n=\frac{U}{K_e}-\frac{2r}{K_T K_e}T_e \tag{3-38}$$

无刷直流电动机与有刷直流电动机的机械特性类似，通过调节电枢电流可以实现转矩控制，同时通过调节电源电压可以实现无刷直流电动机的调速控制。

3.3.5　无刷直流电动机的控制

1. 无刷直流电动机的控制方法

按照获取转子位置信息的方法划分，无刷直流电动机的控制方法可以分为有位置传感器控制和无位置传感器控制两种。

(1) 有位置传感器控制。有位置传感器控制方法是指在无刷直流电动机定子上安装位置传感器来检测转子旋转过程中的位置，将转子磁极的位置信号转换成电信号，为电子换相电路提供正确的换相信息，以此控制电子换相电路中的功率开关管的开关状态，保证电动机各相按顺序导通，在空间形成跳跃式的旋转磁场，驱动永磁转子连续不断地旋转。

无刷直流电动机中常用的位置传感器有霍尔元件位置传感器、磁敏晶体管位置传感器、光电式位置传感器等。

① 霍尔元件位置传感器。将霍尔元件作为位置传感器时，将其安装在电动机气隙内的定子侧。随着转子的转动，穿过霍尔元件的磁场强度将会发生周期性变化。霍尔元件的输出电动势也会相应的发生变化。通过检测这个电动势就可以了解电动机转子的位置。霍尔元件成本低，性能优良，是最为常用的一种电动机转子位置传感器。

② 磁敏晶体管位置传感器。磁敏晶体管是一种对它所在位置的磁场强度大小敏感的半导体元件。常见的有磁敏二极管和磁敏晶体管。以磁敏二极管为例，当给它加以正向偏置时，受外界磁场强度的影响，它的正向压降变化很显著。当磁敏二极管用作电动机转子位置传感器时，也安装在气隙内定子侧。转子旋转引起穿过磁敏二极管的磁场强度发生变化，磁敏二极管的正向压降也随之发生变化，检测这个压降就可以确定电动机的转子位置。

③ 光电式位置传感器。光电式位置传感器是利用光电效应而制成的，它与电动机同轴安装，由跟随电动机转子一起旋转的遮光板和固定不动的光源及光敏管组成，在遮光板上开有120°左右电角度的透光缝。当转子旋转到一定的位置，遮光板挡住光源时，光敏管只能通过“暗电流”。当透光缝转到光源与光敏管之间时，光敏管中流过“亮电流”。这样，遮光板随着转子位置信息就反映在了光敏管中的电流上，检测光敏管流过的电流就可以得到电动机的转子位置信号。光电式位置传感器性能较稳定，但对使用环境的要求较高。

有位置传感器控制方法和控制电路都比较简单，控制系统成本低，从而得到了比较广泛的应用。然而，有位置传感器控制方法有其自身不可避免的许多缺点。由于位置传感器的存在，使电动机结构变得复杂，增加了电动机成本；电动机与控制部分的连接线增加，降低了系统的可靠性，且维修困难；在高温、冷冻、湿度大、有腐蚀物质、空气污浊等工作环境及振动、高速运行等工作条件下，都会降低传感器的可靠性；若传感器损坏，还可能发生连锁反应引起逆变器等器件的损坏；传感器的安装精度对电动机的运行性能有较大的影响，相对增加了生产工艺的难度。

由此可见，虽然有位置传感器的驱动方式简单、方便，但在很多特殊场合，无法使用传感器检测转子位置。因此位置传感器的存在，在一定程度上限制了无刷直流电动机的进一步推广和应用。

(2) 无位置传感器控制。无刷直流电动机的无位置传感器控制，无需安装传感器，使用场合广，相对于有位置传感器方法有较大的优势，因此，无刷直流电动机的无位置传感器控制近年来已成为研究的热点。

无刷直流电动机的无位置传感器控制中，不直接使用转子位置传感器，但在电动机运转过程中，仍然需要转子位置信号，以控制电动机换相。因此，如何通过软硬件间接获得可靠的转子位置信号，成为无刷直流电动机无位置传感器控制的关键。为此，国内外的研究人员在这方面作了大量的研究工作，提出了多种转子位置信号检测方法，大多是利用检测定子电压、电流等容易获取的物理量实现转子位置的估算。归纳起来，可以分为反电动势法、电感法、状态观测器法、电动机方程计算法、人工神经网络法等。

反电动势法是通过检测电动机输出的反电动势来确定转子的位置，使电动机正确换相。现在的无传感器控制中，大部分使用的是这种方法。

按照对反电动势处理方法的不同，它又分为反电动势过零检测法、反电动势积分法、反电动势三次谐波检测法等。

① 反电动势过零检测法。在无刷直流电动机中，定子绕组的反电动势为梯形波，且正负交变；绕组反电动势发生过零后，延迟对应于30°电角度的时间，即为电动机换相时刻。因此，只要检测到各相反电动势的过零点，即可获知转子的若干个关键位置，实现无位置传感器无刷直流电动机换相控制。

通常，无刷直流电动机运行中，在任意时刻逆变器中总有一相的功率管器件全部关断，处于悬空状态，绕组反电动势的过零点就发生在该相绕组悬空的时间段内，此时，只要检测绕组中相电压的变化，即可检测到反电动势过零点。这种通过检测无刷直流电动机相电压获得反电动势的方法，由于成本或工艺的原因，大多数无刷直流电动机不引出绕组中点，反电动势过零检测法主要通过检测电动机端电压获取反电动势过零点。其方法有低通滤波法、PWM关断检测法、数字计算法等。

反电动势过零检测法是目前应用最广泛的无位置传感器无刷直流电动机控制方法。

② 反电动势积分法。这种检测方法是通过电动机不导通相反电动势的积分来获取位置信息，当截止相反电动势过零时开始对其绝对值积分，当积分值达到一个设定的阈值时停止积分，便获得了转子位置，并对应于定子绕组的换流时刻。该方法对于开关噪声不敏感，积分阈值可以根据转速信号自动调节，低速时反电动势信号很弱，也需要采取开环起动方式。

有人提出了相似的反电动势逻辑电平积分比较法，将两路导通相反电动势进行过零比较处理，得到逻辑电平后再对两路逻辑电平进行积分，这两个积分值之间的关系实际上反映了相位关系，从而确定出转子的磁极位置。这种方法只需检测非导通相反电动势的极性，有利于改善低速性能，调速范围可以达到10～1500r/min。

③ 反电动势三次谐波检测法。无刷直流电动机的梯形波反电动势包含基波以及其他高次谐波分量。将三相反电动势相加，可以消去基波分量以及五次、七次谐波分量，剩下三次谐波以及其他高次谐波分量。无论转速以及负载的情况如何变化，三次谐波分量和转子磁通都保持一个固定的相位关系，并且不受逆变器开关噪声的影响，因此是一种可靠的

检测方法。

三次谐波频率是基波频率的3倍，因此，相对于一般的反电动势检测方法，反电动势三次谐波检测方法可以检测更低的转速；电动机起动也相对容易。三次谐波法只需要一个很小的滤波器就可以，因而相比反电动势过零点检测法，受滤波延迟的影响较小，可以在更宽的调速范围内具有很好的性能。

④ 通过续流二极管间接检测反电动势。在三相、星形、六状态的无刷直流电动机中，当采用斩波方式对电动机进行控制时，非导通相的反电动势将使续流二极管中有电流流过，且续流二极管在两次换相的中点时刻开始导通或者停止导通，这恰好是非导通相反电动势的过零点。因此，可以通过检测非导通相的续流二极管是否导通间接的检测反电动势的过零点。这种检测方法比直接检测反电动势过零点要精确，因而可以在一个很宽的转速范围内有效，包括很低的转速，但不能为零。由于可以在很低的转速时工作，因此这种方法也使得电动机起动要比其他方法简单。

这种方法最大的缺点是必须提供6个用于比较电路的隔离电源。

2. 无刷直流电动机的控制技术

随着电动机及驱动系统的发展，控制系统趋于智能化和数字化，使得许多较复杂的控制技术得以实现。这些控制技术的实现又进一步推动了无刷直流电动机在各个工业领域更好地应用，为无刷直流电动机的发展开辟了广阔的前景。

目前，应用到无刷直流电动机控制系统的控制技术主要有PID控制、模糊控制和神经网络控制等。

(1) PID控制技术。在古典控制理论中，应用最成功的是PID控制。它是一种在工业生产中广泛应用的常规控制算法，属于线性控制。这种控制方式的最大优点是结构简单，使用方便。该算法由于其简单实用而被广大工程技术人员所熟悉。

传统的无刷直流电动机调速通常采用PID控制，它算法简单，参数调整方便，具有较好的控制精度。

(2) 模糊控制技术。所谓模糊控制，是指在控制方法上应用模糊集理论、模糊语言变量及模糊逻辑推理来模拟人的模糊思维方法，用计算机实现与操作者相同的控制。模糊控制技术不依赖于精确的数学模型，对参数变换不敏感，适用性强，具有很好的鲁棒性。它通过把专家的经验或手动操作人员长期积累的经验总结成若干条规则，采用简便、快捷、灵活的手段来完成那些用经典和现代控制理论难以完成的自动化和智能化的目标。

模糊控制技术应用于无刷直流电动机的调速系统，可以克服PID控制器在工作环境不稳定，负载或参数变化时，控制效果不佳的问题。

另外，模糊控制与PID控制结合可以设计出性能更好的控制器。

(3) 神经网络控制技术。神经网络是模拟人脑神经细胞的神经元广泛互联而成的网络。由于神经网络辨识电动机参数不依赖于精确的数学模型，具有很高的控制精度，因而在模式识别、参数辨识领域中得到了广泛的应用。

目前已有神经网络模糊PID控制器应用于无刷直流电动机调速系统的实例。该系统利用神经网络所具有的任意非线性表示能力，通过对系统的性能学习来实现具有最佳组合的PID控制，同时又针对神经网络控制器在大误差范围内电流过早饱和，不利于响应快速性的缺点，加入了模糊控制来改善性能，提高响应的快速性。

3. 无刷直流电动机的控制器

对于无刷直流电动机的控制器，当前主要有专用集成电路(ASIC)控制器、微处理器(MCU)和数字信号处理器(DSP)3种方式。

对于专用集成电路，现在几乎所有先进工业国家的半导体商，都能提供自己开发的电动机控制专用集成电路。但使用时灵活性较差，受到的限制过多。

现在无刷直流电动机控制器大多采用单片机来实现。但单片机的处理能力有限，特别是需要处理的数据量大、实时性和精度要求高时，单片机往往不再能满足要求。

数字信号处理器能够对输入输出数据进行高速处理(其运算速度比单片机快一个数量级)，特别是DSP器件还提供了高度专业化的指令集，提高了数字滤波器的运算速度，这样使得它在控制器的规则实施、矢量控制和矩阵变换方面具有很大的优势。若要无刷直流电动机完成一些较复杂的控制功能，如电压电流双闭环调速、转子电流正弦波驱动，则必须要用运动控制专用微处理器。运动控制专用微处理器都是将电动机控制所需的外围功能电路集成在一个DSP芯片内，其具有体积小、结构紧凑、易于使用、可靠性高的特点，运算速度及处理能力大大增强，确保了系统具有更优越的控制性能。因此，采用DSP作为控制芯片将是今后的发展方向。另外，采用DSP的专用集成块的另一优点就是可以降低系统对传感器等外围器件的要求，通过复杂的算法可以达到同样的控制性能，降低了成本，提高了可靠性。

4. 基于DSP的无刷直流电动机无位置传感器控制

Texas Instrument(TI)公司的240x系列DSP控制器是专为电动机控制设计的，它把高性能的DSP内核和微控制器的外围集成在同一块芯片上，替代了传统的微控制器单元和多芯片设计，具有传统16位微处理器及控制器无法比拟的运算性能。利用TMS320LF2407 DSP控制器构成的无刷直流电动机的无位置传感器控制系统硬件结构如图3.19所示。

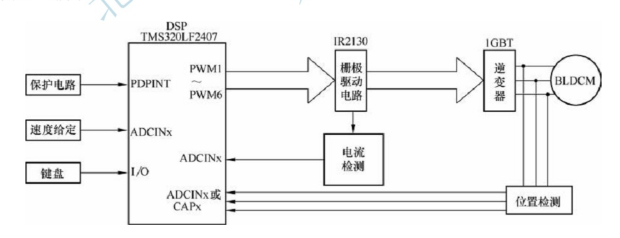


图3.19 基于DSP的无位置传感器控制系统硬件

采用“端电压法”检测反电动势过零点，得到三路位置信号，构成位置闭环来控制电枢绕组的换相。同时，通过记录两次换相的时间间隔可计算电动机的转速。反电动势过零点的比较既可以通过软件实现，也可以通过硬件电路实现，不同的方法使用DSP的不同端口。

由 DSP 控制器输出六路 PWM 信号(PWM1～PWM6)来控制逆变器的开关管，PWM 波的输出受换相信号和转速调节器的控制。

电流信号通过串联在主回路中的采样电阻获得，电流信号一方面输入到 DSP 的 ADCINx(x=1、2、3)引脚，通过 A/D 转换单元转换为数字信号，用于电流闭环调节；另一方面可用于过电流保护。

反电动势过零点检测方程为

$$\begin{cases} e_a = u_{a0} - u_N = u_{a0} - (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0})/3 \\ e_b = u_{b0} - u_N = u_{b0} - (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0})/3 \\ e_c = u_{c0} - u_N = u_{c0} - (u_{a0} + u_{b0} + u_{c0})/3 \end{cases} \tag{3-39}$$

可见，只要检测出电动机的端电压和中性点电压，然后进行比较，就可以得到反电动势的过零点。

电压比较可以采用两种不同的方法：利用硬件电路(电压比较器)进行比较和利用软件进行比较。采用硬件电压比较器检定电动势过零点需要引进一个在整个工作频率范围内都要具有恒定相移的无源低通滤波器，设计出完全满足这种要求的滤波器比较困难。为此，可以利用 DSP 强大的运算处理能力，在程序中采用软件滤波的方法，同时反电动势过零点的检定及过零点相移 30°电度角换相等处理都由软件实现。

如图 3.20 所示，采用分压电阻检测三相端电压，检测到的电压信号经过隔离、放大后分别送到 TMS320LF2407 的 ADCIN01～ADCIN03 通道。图中，HCPL7800 为高共模抑制比隔离运算放大器，双电源供电，具有良好的线性度，在高噪声环境下也能保证较高的精度和稳定性。TMS320LF2407 的工作电压为 3.3V，故采用集成运放 LF353 将电压信号转换为 0～3.3V 的单极性电压信号。

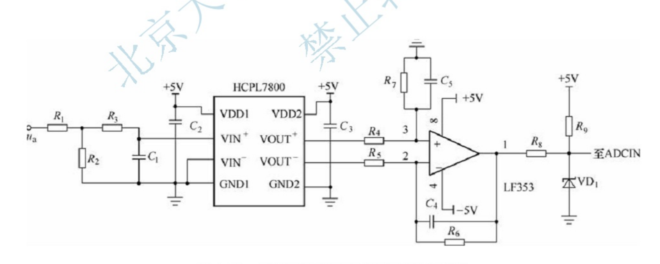


图 3.20　端电压检测电路及其与 DSP 的接口

3 个电压信号转换为数字量后，通过软件检定反电动势过零点，并经 30°移相确定换相点，可构成图 3.21 所示的双闭环控制系统。

30°移相的估计与转速计算的原理相同。因为电动机为每隔 60°电角度换相一次，则两次换相发生的时间间隔的一半 $\Delta t/2$ 就是 30°移相对应的延迟时间。

为保证系统中功率电路安全可靠的工作，DSP 控制器提供了功率驱动保护中断 PD-PINT。当该引脚 PDPINT 被置为低电平时，DSP 内部定时器立即停止计数，所有 PWM

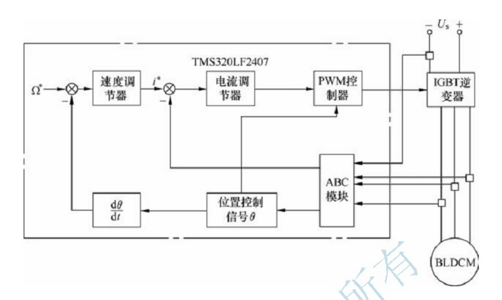


图 3.21 基于 DSP 的无刷直流电动机无位置传感器控制系统原理图

输出引脚全部呈高阻态。利用它可方便地实现系统的各种保护功能。

故障处理电路原理如图 3.22 所示，过电压、欠电压、过电流、过热等各种故障信号一方面输入或非门(如 CD4078)，一方面送入 DSP 进行判别。当任一种故障发生时，或非门输出一个低电平信号，向 DSP 申请故障中断，封锁 PWM 输出，实现系统的保护功能。同时通过 LED 显示相应的故障信号。过电压、欠电压和过电流检测都是通过比较器实现的。

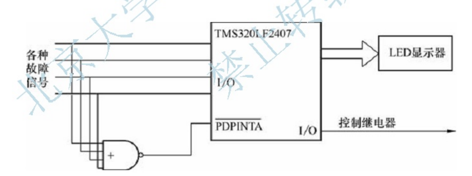


图 3.22 故障处理电路原理图

此外，在实际系统中，当故障发生时还可通过 DSP 的 I/O 口控制继电器，切断系统的主回路。

基于 TMS320LF2407 DSP 的无刷直流电动机无位置传感器控制软件框图如图 3.23 所示。

系统软件主要由以下模块组成：

(1) 初始化模块。主要完成系统时钟、看门狗、I/O 端口、系统中断、事件管理器的各个控制寄存器及其中断等的设置，以及软件中各变量的初始化和辅助寄存器的设置等功能。

(2) 启动控制模块。完成转子预定位、开环启动等功能。

(3) A/D 转换模块。利用 DSP 内部 A/D 转换单元完成相电流和端电压的 A/D 转换。

(4) 转子位置估算模块。根据端电压的值检测非导通相的反电动势过零点。由于反电

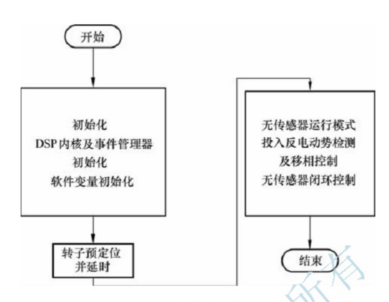


图 3.23 软件控制软件框图

动势过零点并不是换相点，因此还需要根据记录的上一个 60°区间对应的时间间隔完成 30°移相功能。同时，如同在有位置传感器控制中捕获位置信号的上升沿、下降沿一样，在软件中也可以根据非导通相端电压与中性点电压的比较值的符号(大于 0 或小于 0)，确定反电动势过零点的具体位置，从而确定换相逻辑。

(5) 换相控制模块。根据换相逻辑控制功率开关管的换相。

(6) PWM 波形发生模块。PWM 波形生成主要是通过设置 TMS320LF2407 事件管理模块的 PWM 波形发生器，将定时器 1 设置成连续升序计数模式，计数周期根据 PWM 周期设成 50μs，对应 20kHz 频率。然后在每一个采样流程根据转速环转速比较值对 3 个全比较单元的比较寄存器值进行刷新。同时，在该模块，通过查表法，获得当前换相指针所对应的 ACTR(全比较动作控制寄存器)值，并送到 ACTR 寄存器。完成对 PWM1～PWM6 引脚状态的定义。

(7) 数字 PID 模块。对转速误差和电流误差进行调解，控制 PWM 占空比。

(8) 系统故障保护模块。当系统出现故障时，一方面由硬件立刻封锁主开关的驱动信号，另一方面，故障信号输入 DSP 的 I/O 口，DSP 进入故障处理程序。首先经过一定的延时以防止误报警，如果延时时间到，系统还有报警信号，则通过 I/O 口控制继电器，切断主电路并显示故障类型。

3.4 异步电动机

异步电动机又称感应电动机，是由气隙旋转磁场与转子绕组感应电流相互作用产生电磁转矩，从而实现电能量转换为机械能量的一种交流电动机。

异步电动机的种类很多。最常见的方法是按转子结构和定子绕组相数分类。按照转子结构来分，有笼型异步电动机和绕线型异步电动机；按照定子绕组相数来分，有单相异步电动机、两相异步电动机和三相异步电动机。异步电动机是各类电动机中应用最广、需要量最大的一种。在电动汽车中，主要使用笼型异步电动机。下面介绍的异步电动机就是指

三相笼型异步电动机。

3.4.1 异步电动机的结构与特点

1. 异步电动机的结构

异步电动机主要由静止的定子和旋转的转子两大部分组成，定子和转子之间存在气隙，此外，还有端盖、轴承、机座和风扇等部件。图 3.24 所示为三相异步电动机的典型结构。

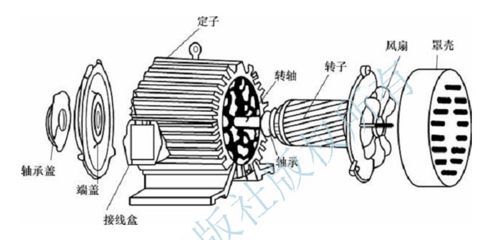


图 3.24 三相异步电动机的典型结构

(1) 定子。异步电动机的定子由定子铁心、定子绕组和机座构成。

① 定子铁心。定子铁心是电动机磁路的一部分，并在其上放置定子绕组。定子铁心一般由 0.35～0.5mm 厚表面具有绝缘层的硅钢片冲制、叠压而成，在铁心的内圆冲有均匀分布的槽，用以嵌放定子绕组。定子铁心槽型有半闭口型槽、半开口型槽和开口型槽 3 种。

② 定子绕组。定子绕组是电动机的电路部分，通入三相交流电，产生旋转磁场。定子绕组由 3 个在空间互隔 120°电角度、对称排列的结构完全相同的绕组连接而成，这些绕组的各个线圈按一定规律分别嵌放在定子各槽内。

③ 机座。机座主要用于固定定子铁心与前后端盖，以支撑转子，并起防护、散热等作用。机座通常为铸铁件，大型异步电动机机座一般用钢板焊成，微型电动机的机座采用铸铝件。封闭式电动机的机座外面有散热筋以增加散热面积，防护式电动机的机座两端端盖开有通风孔，使电动机内外的空气可直接对流，以利于散热。

(2) 转子。异步电动机的转子由转子铁心、转子绕组和转轴组成。

① 转子铁心。转子铁心也是电动机磁路的一部分，并在铁心槽内放置转子绕组。转子铁心所用材料与定子一样，由 0.5mm 厚的硅钢片冲制、叠压而成，硅钢片外圆冲有均匀分布的孔，用来安置转子绕组。通常用定子铁心冲落后的硅钢片内圆来冲制转子铁心。一般小型异步电动机的转子铁心直接压装在转轴上，大、中型异步电动机(转子直径为 300～400mm)的转子铁心则借助与转子支架压在转轴上。

② 转子绕组。转子绕组是转子的电路部分，它的作用是切割定子旋转磁场产生感应电动势及电流，并形成电磁转矩而使电动机旋转。转子绕组分为笼式转子和绕线式转子。

③ 转轴。转轴用于固定和支撑转子铁心，并输出机械功率。转轴一般使用中碳钢

制成。

(3) 气隙。异步电动机定子与转子之间有一小的间隙，称为电动机气隙。气隙的大小对异步电动机的运行性能有很大影响。中小型异步电动机的气隙一般为0.2～2mm；功率越大，转速越高，气隙尺寸越大。

2. 异步电动机的特点

异步电动机的基本特点是，转子绕组不需与其他电源相连，其定子电流直接取自交流电力系统；与其他电动机相比，异步电动机的结构简单，制造、使用、维护方便，运行可靠性高，质量轻，成本低。以三相异步电动机为例，与同功率、同转速的直流电动机相比，前者质量只及后者的1/2，成本仅为1/3。异步电动机还容易按不同环境条件的要求，派生出各种系列产品。它还具有接近恒速的负载特性，能满足大多数工农业生产机械拖动的要求。

异步电动机的局限性是，它的转速与其旋转磁场的同步转速有固定的转差率，因而调速性能较差，在要求有较宽广的平滑调速范围的使用场合，不如直流电动机经济、方便。此外，异步电动机运行时，从电力系统吸取无功功率以励磁，这会导致电力系统的功率因数变坏。因此，在大功率、低转速场合不如用同步电动机合理。

3.4.2 异步电动机的工作原理

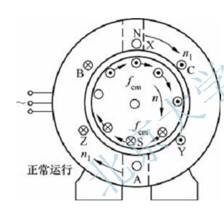


图3.25 异步电动机工作原理图

图3.25为异步电动机工作原理图。

当异步电动机的三相定子绕组通入三相交流电后，将产生一个旋转磁场，该旋转磁场切割转子绕组，从而在转子绕组中产生感应电动势，电动势的方向由右手定则来确定。由于转子绕组是闭合通路，转子中便有电流产生，电流方向与电动势方向相同，而载流的转子导体在定子旋转磁场作用下将产生电磁力，电磁力的方向可用左手定则确定。由电磁力进而产生电磁转矩，驱动电动机旋转，并且电动机旋转方向与旋转磁场方向相同。

异步电动机的转子转速不等于定子旋转磁场的同步转速，这是异步电动机的主要特点。

如果电动机转子轴上带有机械负载，则负载被电磁转矩拖动而旋转。当负载发生变化时，转子转速也随之发生变化，使转子导体中的电动势、电流和电磁转矩发生相应变化，以适应负载需要。因此，异步电动机的转速是随负载变化而变化的。

异步电动机的转子转速与定子旋转磁场的同步转速之间存在转速差，它的大小决定着转子电动势及其频率的大小，直接影响异步电动机的工作状态。通常将转速差与同步转速的比值，用转差率表示，即

$$s=\frac{n_1-n}{n_1} \tag{3-40}$$

式中，s为转差率；n_1为定子旋转磁场的同步转速；n为转子转速。

转差率是异步电动机运行时的一个重要物理量。异步电动机运行时，取值范围为$0<s<1$。在额度负载条件下运行时，一般额定转差率$s=0.01\sim0.06$。

3.4.3 异步电动机的运行特性

1. 异步电动机的工作特性

异步电动机的工作特性是指电动机在保持额定电压和额定频率不变的情况下，电动机的转速、电磁转矩、定子电流、效率和功率因数随输出功率变化的特性。一般通过负载试验来测取。图 3.26 所示是异步电动机的工作特性。

工作特性是异步电动机的重要特性。转速特性和转矩特性关系到电动机与机械负载匹配的合理性；定子电流特性可以表明电动机的发热情况，关系到电动机运行的可靠性和使用寿命；效率特性和功率因数特性关系到电动机运行的经济性。

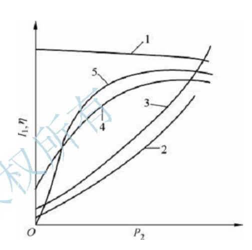


图 3.26 异步电动机的工作特性

1—转速特性；2—转矩特性；3—定子电流特性；4—功率因数特性；5—效率特性

2. 异步电动机的机械特性

异步电动机的机械特性是指电动机在恒定电压和恒定频率的情况下，电动机的转速与转矩之间的关系，是电动机的重要特性。机械特性曲线一般包括异步电动机的起动转矩、起动过程的最小转矩、最大转矩、额定转矩、同步转速、额定转速等重要技术数据，以及电动机转速随转矩变化的情况。

异步电动机的机械特性分为自然机械特性和人为机械特性。

在电源电压和电源频率恒定且定、转子回路不接入任何附加设备时的机械特性称为自然机械特性，如图 3.27 所示。图中，T_{st} 为异步电动机的起动转矩；T_{min} 为起动过程的最小转矩；T_{max} 为最大转矩；T_N 为额定转矩；n_1 为同步转速；n_N 为额定转速。

电源电压、电源频率、电动机极对数、定子或转子回路接入其他附属设备，其中任意一项改变得到的机械特性称为人为机械特性。图 3.28 所示为电源电压改变时的人为机械特性。由于电源频率不变，所以同步转速点不变，电磁转矩与电源电压的平方成比例变化，但各条曲线的最大转矩点对应的转差率基本保持不变。

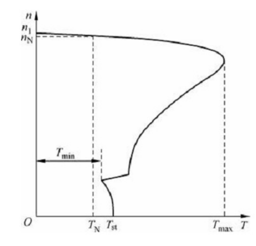


图 3.27 异步电动机的自然机械特性

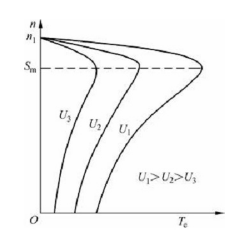


图 3.28 电源电压改变时的人为机械特性

3.4.4 异步电动机的数学模型

异步电动机的数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。

在研究异步电动机的多变量数学模型时，常作如下假设：

(1) 忽略空间谐波，设三相绕组对称(在空间互差120°电角度)，所以产生的磁动势沿气隙圆周为正弦规律；

(2) 忽略磁路饱和，各绕组的自感和互感都是恒定的；

(3) 忽略铁心损耗；

(4) 不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响。

无论电动机转子是绕型还是笼型的，都将它等效成线转子，并折算到定子侧，折算后的每相绕组匝数都相等。这样，实际电动机绕组就等效成图3.29所示的三相异步电动机的物理模型。图中，定子三相绕组轴线A、B、C在空间是固定的，以A轴为参考坐标轴；转子绕组轴线a、b、c随转子旋转，转子a轴和定子A轴间的电角度θ为空间位移变量。规定各绕组电压、电流、磁链的正方向符合电动机惯例和右手螺旋法则。这时，异步电动机的数学模型由电压方程、磁链方程、转矩方程和运动方程组成。

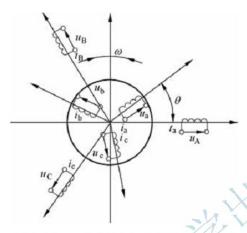


图3.29 三相异步电动机的物理模型

1) 电压方程

三相定子绕组的电压平衡方程为

$$
\begin{aligned}
u_A &= i_A R_1 + \frac{d\Psi_A}{dt} \\
u_B &= i_B R_1 + \frac{d\Psi_B}{dt} \\
u_C &= i_C R_1 + \frac{d\Psi_C}{dt}
\end{aligned}
\tag{3-41}
$$

三相转子绕组折算到定子侧后的电压方程为

$$
\begin{aligned}
u_a &= i_a R_2 + \frac{d\Psi_a}{dt} \\
u_b &= i_b R_2 + \frac{d\Psi_b}{dt} \\
u_c &= i_c R_2 + \frac{d\Psi_c}{dt}
\end{aligned}
\tag{3-42}
$$

式中，u_A、u_B、u_C、u_a、u_b、u_c分别为定子和转子相电压的瞬时值；i_A、i_B、i_C、i_a、i_b、i_c分别为定子和转子相电流的瞬时值；Ψ_A、Ψ_B、Ψ_C、Ψ_a、Ψ_b、Ψ_c分别为各相绕组的全磁链；R_1、R_2分别为定子和转子绕组的电阻。

上述各量度已折算到定子侧。将电压方程写成矩阵形式，并以微分算子P代替微分符号$\frac{d}{dt}$，则有

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \tag{3-43}$$

2）磁链方程

每个绕组的磁链是它本身的自感磁链和其他绕组对它的互感磁链之和，因此，6个绕组的磁链可表示为

$$\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \\ \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3-44}$$

式中，对角线元素 L_{AA}、L_{BB}、L_{CC}、L_{aa}、L_{bb}、L_{cc} 是各有关绕组的自感，其余各项是绕组间的互感。

根据磁链方程式(3－44)和电压方程式(3－43)，可以得到展开后的电压方程为

$$u = Ri + P(Li) = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t}i = Ri + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + \omega\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t}i \tag{3-45}$$

式中，$L\mathrm{d}i/\mathrm{d}t$ 项属于电磁感应电动势中的脉变电动势(或称变压器电动势)；$(\mathrm{d}L/\mathrm{d}t)\omega i$ 项属于电磁感应电动势中与转速 ω 成正比的旋转电动势。

3）运动方程

在一般情况下，电气传动系统的运动方程式为

$$T_e = T_L + \frac{J}{p}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} + \frac{D}{p}\omega + \frac{K}{p}\theta \tag{3-46}$$

式中，T_L 为负载转矩；J 为机组的转动惯量；D 为与转速成正比的负载转矩阻尼因数；K 为扭转弹性转矩因数；p 为极对数。

对于恒转矩负载，$D=0$，$K=0$，则

$$T_e = T_L + \frac{J}{p}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} \tag{3-47}$$

4）转矩方程

按照机电能量转换原理，可求出电磁转矩 T_e 的表达式为

$$T_e = pL_{m1}[(i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c)\sin\theta + (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)\sin(\theta + 120°) + (i_A i_c + i_B i_c + i_C i_b)\sin(\theta - 120°)] \tag{3-48}$$

应该指出，式(3－48)是在磁路为线性、磁动势在空间按正弦分布的假定条件下得出的，但对定、转子电流的波形未做出任何假定，式中 i 都是瞬时值。因此，此电磁转矩公式同样适应于由变压变频器供电的三相异步电动机调速系统。

5）三相异步电动机的数学模型

将前述式子归纳起来，便构成在恒转矩负载下三相异步电动机的多变量非线性数学模

型，即

$$
\begin{aligned}
u&=Ri+L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+\omega\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta}i\\
T_{\mathrm{e}}&=T_{\mathrm{L}}+\frac{J}{p}\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}\\
\omega&=\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}
\end{aligned}
\tag{3-49}
$$

3.4.5 异步电动机的控制

异步电动机是一个多变量(多输入输出)系统，其中变量电压(电流)、频率、磁通、转速之间又相互影响，所以其又是强耦合的多变量系统。如何对这样一个非线性、多变量、强耦合的复杂系统进行有效控制，成为研究的重点。把经典理论与现代控制理论相结合，已经形成了诸多有效的控制策略与方法。

目前对异步电动机的调速控制主要有恒压频比开环控制(VVVF)、转差控制、矢量控制(VC)以及直接转矩控制(DTC)等。

恒压频比开环控制实际上只控制了电动机磁通而没有控制电动机的转矩，采用这样的控制系统对异步电动机来讲根本谈不上控制性能，通常只用于对调速性能要求一般的通用变频器上。

转差控制是根据异步电动机电磁转矩和转差频率的关系来直接控制电动机的转矩的，可以在一定的转差频率范围内，一定程度上通过调节转差来控制电动机的电磁转矩，从而改善调速系统的控制性能，但其控制理论是建立在异步电动机的稳态数学模型基础上的，它适合于电动机转速变化缓慢或者对动态性能要求不高的场合。

这里主要介绍异步电动机的矢量控制和直接转矩控制。

1. 异步电动机的矢量控制

矢量控制理论采用矢量分析的方法来分析交流电动机内部的电磁过程，是建立在交流电动机的动态数学模型基础上的控制方法。它模仿对直流电动机的控制技术，将交流电动机的定子电流解耦成互相独立的产生磁链的分量和产生转矩的分量。分别控制这两个分量就可以实现对交流电动机的磁链控制和转矩控制的完全解耦，从而达到理想的动态性能。

(1) 异步电动机矢量控制方式的选择。异步电动机矢量控制是基于磁场定向的方法，其调速控制系统的方式比较复杂，常用的控制策略有以下几种。

① 转子磁场定向矢量控制原理。交流电动机的转矩与定转子旋转磁场及其夹角有关，要控制好转矩，必须精确检测和控制磁通，在此种控制方式中，检测出定子电流的 d 轴分量，就可以观测出转子磁链的幅值。当转子磁链恒定时，电磁转矩和电流的 q 轴分量成正比，忽略反电动势引起的交叉耦合，可以由电压方程 d 轴分量控制转子磁通，q 轴分量控制转矩，目前大多数变频系统是使用此种控制方法的。它实现了系统的完全解耦，但是其最大的缺点是转子磁通的观测受转子时间常数的影响。

② 转差率矢量控制原理。如果使电动机的定子、转子或气隙磁场中一个保持不变，电动机的转矩就主要由转差率决定。因此，此方法主要考虑转子磁通的稳态方程式，从转子磁通直接得到定子电流 d 轴分量，通过对定子电流的有效控制，形成了转差矢量控制，

避免了磁通的闭环控制，不需要实际计算转子的磁链，用转差率和量测的转速相加后积分来计算磁通相对于定子的位置，但此种方法主要应用在低速系统中，而且系统性能同样受转子参数变化影响。

③ 气隙磁场定向矢量控制原理。除了转子磁场的定向控制以外，还有一些控制系统使用的是气隙磁场的定向控制，此种方法比转子磁通的控制方式要复杂，但其利用了气隙磁通易于观测的优点，保持气隙磁通的恒定，从而使转矩与 q 轴电流成正比，直接对 q 轴电流控制，达到控制电动机的目的。

④ 定子磁场定向矢量控制原理。由于转子磁通的检测容易受电动机参数影响，气隙磁通的检测需要附加一些额外的检测器件等弊端的存在，国内外兴起了定子磁场定向的矢量控制方法，此种方法是通过保持定子磁通不变，控制与转矩成正比的 q 轴电流，从而控制电动机。但是，此种方法和气隙磁场定向的矢量控制一样，需要对电流进行解耦，而且以定子电压作为测量量，容易受到电动机转速的影响。

(2) 异步电动机矢量控制的特点。矢量控制变频器可以分别对异步电动机的磁通和转矩电流进行检测和控制，自动改变电压和频率，使指令值和检测实际值达到一致，从而实现了变频调速，大大提高了电动机控制静态精度和动态品质。转速精度约等于 0.5%，转速响应也较快。采用矢量变频器异步电动机变频调速可以得到控制结构简单，可靠性高的效果。其主要表现在以下几个方面：

① 可以从零转速起进行速度控制，因此调速范围很宽广；

② 可以对转矩实行较为精确的控制；

③ 系统的动态响应速度很快；

④ 电动机的加速度特性很好。

带速度传感器矢量控制变频器的异步电动机闭环变频调速技术性能虽较好，但是毕竟它需要在异步电动机轴上安装速度传感器，已经使异步电动机结构坚固、可靠性高的特点打了折扣。况且，在某些情况下，由于电动机本身或环境的限制因素无法安装速度传感器。系统增加了反馈电路和其他辅助环节，也增加了出故障的概率。因此，对于调速范围、转速精度和动态品质要求不是特别高的场合，往往采用无速度传感器矢量变频式的开环控制异步电动机变频调速系统。

2. 异步电动机直接转矩控制

直接转矩控制是将电动机输出转矩作为直接控制对象，通过控制定子磁场向量控制电动机转速。它不需要复杂的坐标变换，也不需要依赖转子数学模型，只是通过控制 PWM 型逆变器的导通和切换方式，控制电动机的瞬时输入电压，改变磁链的旋转速度来控制瞬时转矩，使系统性能对转子参数呈现鲁棒性。并且这种方法被推广到弱磁调速范围。逆变器的 PWM 采用电压空间向量控制方式，性能优越。但同时不可避免地产生转矩脉动，调速性能降低的问题。此外，该方法对逆变器开关频率提高的限制较大，定子电阻对电动机低速性能也有较大影响，如在低速区，定子电阻的变化引起的定子电流和磁链的畸变，以及转矩脉动、死区效应和开关频率等问题。

(1) 异步电动机直接转矩控制系统的结构与原理。直接转矩控制系统框图如图 3.30 所示。它主要包括磁链调节器、转矩调节器、磁链和转矩观测器、转速调节器等。其中磁链观测器对磁链的观测是否准确对整个控制系统的稳定性有着举足轻重的作用，而开关策

略和磁链、转矩调节是先进控制算法的核心部分。

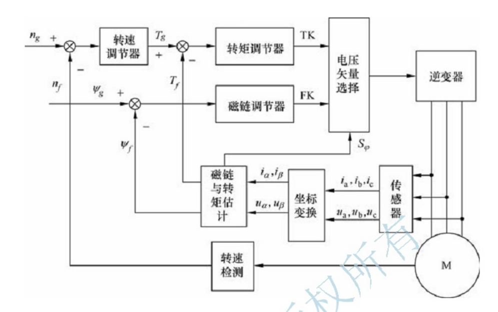


图 3.30　直接转矩控制系统框图

① 磁链观测器。定子磁链观测器的准确性，可以说是直接转矩控制技术实现的关键。定子磁链无论是幅值还是相位，若出现较大的误差，控制性能都会变坏，或者出现不稳定。解决磁链问题的较为通用的方法是采用间接测量的方法，即通过测量的定子电压、定子电流和转速等建立定子磁链的观测模型，在控制中实时准确地算出定子磁链的幅值和相位。常用的磁链观测模型有基于定子电压和电流的磁链观测模型，基于定子电流和转速的磁链观测模型，以及基于定子电压和转速的磁链观测模型。

② 磁链调节器。控制定子磁链在给定值的附近变化，输出磁链控制信号。

③ 转矩观测器。转矩观测器的任务是用状态检测转矩模型，完成电磁转矩的计算。

④ 转矩调节器。转矩调节器的任务是实现对转矩的直接控制。直接转矩控制的名称由此而来。为了控制转矩，转矩调节必须具备两个功能：一个功能是转矩调节器直接调节转矩；另外一个功能是在调节转矩的同时，控制定子磁链的旋转方向，以加强转矩的调节。

⑤ 转速调节器。在直接转矩控制系统中，主要的是通过控制电压空间矢量来控制转速，从而控制转矩。而转矩的控制又成为转速控制的基础，故在系统中应用闭环控制。闭环控制系统具有简洁、直观、有效的性能。从传感器中引出转速反馈信号与转速给定信号作比较后送入 PI 调节器，调节器的输出直接作为转矩的给定值，便可以实现转速的闭环控制。

控制过程如下：通过传感器检测得到定子电流、电压的 $\alpha-\beta$ 分量，然后通过磁链观测器和转矩观测器分别获得定子磁链的实际值 Ψ_f 和转矩的实际值 T_f，将定子磁链的实际值 Ψ_f 与给定值 Ψ_S输入磁链调节器，通过滞环比较器实现磁链的自控制。转速给定值 n_g 与通过速度测量得到的转速 n_f 之差经过转速调节器得到转矩给定值 T_g，将转矩的实际值 T_f 与给定值 T_g 输入转矩调节器，实现转矩的自控制。

（2）直接转矩控制的特点。与矢量控制相比，直接转矩控制有以下主要特点：

① 直接转矩控制直接在定子坐标系下分析交流电动机的数字模型，控制电动机的磁链和转矩。它不需要将交流电动机与直流电动机作比较、等效和转化；既不需要模仿直流电机的控制，也不需要为解耦而简化交流电动机的数学模型。它省掉了矢量旋转变换等复杂的变换和计算。因此，它所需要的信号处理工作特别简单，所用的控制信号使观察者对于交流电动机的物理过程能够做出直接和明确的判断。

② 直接转矩控制磁通估算所用的是定子磁链，只要知道定子电阻就可以把它观测出来。而磁场定向矢量控制所用的是转子磁链，观测转子磁链需要知道电动机转子电阻和电感。因此直接转矩控制大大减少了矢量控制技术中控制性能易受参数变化影响的问题。

③ 直接转矩控制采用空间矢量的概念来分析三相交流电动机的数学模型和控制其各物理量，使问题变得特别简单明了。与矢量控制的方法不同，它不是通过控制电流、磁链等量来间接控制转矩，而是把转矩直接作为被控量，直接控制转矩。因此它并非极力获得理想的正弦波波形，也不专门强调磁链为完全理想的圆形轨迹。相反，从控制转矩的角度出发，它强调的是转矩的直接控制效果，因而它采用离散的电压状态和六边形磁链轨迹或近似圆形磁链轨迹的概念。

④ 直接转矩控制技术对转矩实行直接控制。它的控制效果不取决于电动机的数学模型是否能够简化，而是取决于转矩的实际状况，它的控制既直接又简化。

因此，从理论上看，直接转矩控制有矢量控制所不及的转子参数鲁棒性和结构上的简单性。然而在技术实现上，直接转矩控制往往很难体现出优越性来，调速范围不及矢量控制宽，其根源主要在于其低速转矩特性差、稳态转矩脉动的存在及带负载能力的下降，这些问题制约了直接转矩控制进入实用化的进程。

3.5 永磁同步电动机

永磁同步电动机(Permanent Magnet Synchronous Motor，PMSM)具有高效、高控制精度、高转矩密度、良好的转矩平稳性及低振动噪声的特点，通过合理设计永磁磁路结构能获得较高的弱磁性能，在电动汽车驱动方面具有很高的应用价值，受到国内外电动汽车界的高度重视，是最具竞争力的电动汽车驱动电动机系统之一。

3.5.1 永磁同步电动机的结构与特点

1. 永磁同步电动机结构

永磁同步电动机分为正弦波驱动电流的永磁同步电动机和方波驱动电流的永磁同步电动机。这里介绍的主要是以三相正弦波驱动的永磁同步电动机。

永磁同步电动机的结构示意图如图 3.31 所示，和传统电动机一样，主要由定子和转子两大部分构成。

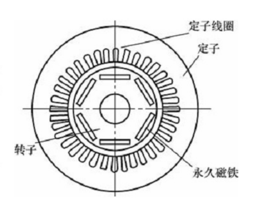


图 3.31 永磁同步电动机的结构示意图

定子与普通感应电动机基本相同，由电枢铁心

和电枢绕组构成。电枢铁心一般采用0.5mm硅钢冲片叠压而成，对于具有高效率指标或频率较高的电动机，为了减少铁耗，可以考虑使用0.35mm的低损耗冷轧无取向硅钢片。电枢绕组则普遍采用分布、短距绕组；对于极数较多的电动机，则普遍采用分数槽绕组；需要进一步改善电动势波形时，也可以考虑采用正弦绕组或其他特殊绕组。

转子主要由永磁体、转子铁心和转轴等构成。其中永磁体主要采用铁氧体永磁和钕铁硼永磁材料；转子铁心可根据磁极结构的不同，选用实心钢，或采用钢板或硅钢片冲制后叠压而成。

与普通电动机相比，永磁同步电动机还必须装有转子永磁体位置检测器，用来检测磁极位置，并以此对电枢电流进行控制，达到对永磁同步电动机驱动控制的目的。

按照永磁体在转子上位置的不同，永磁同步电动机的磁极结构可分为表面式和内置式两种。

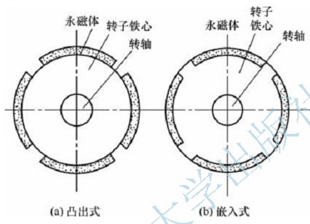


图 3.32　表面式转子磁路结构

(1) 表面式转子磁路结构。表面式转子磁路结构中，永磁体通常呈瓦片形，并位于转子铁心的外表面上，永磁体提供磁通的方向为径向。表面式结构又分为凸出式和嵌入式两种，如图3.32所示。对采用稀土永磁材料的电动机来说，由于永磁材料的相对回复磁导率接近1，所以表面凸出式转子在电磁性能上属于隐极转子结构；而嵌入式转子的相邻两永磁磁极间有着磁导率很大的铁磁材料，故在电磁性能上属于凸极转子结构。

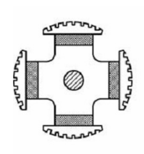
表面凸出式转子结构具有结构简单、制造成本较低、转动惯量小等优点，在矩形波永磁同步电动机和恒功率运行范围不宽的正弦波永磁同步电动机中得到了广泛应用。此外，表面凸出式转子结构中的永磁磁极易于实现最优设计，使之成为能使电动机气隙磁密波形趋近于正弦波的磁极形状，可显著提高电动机乃至整个传动系统的性能。

表面嵌入式转子结构可充分利用转子磁路不对称性所产生的磁阻转矩，提高电动机的功率密度，动态性能较凸出式有所改善，制造工艺也较简单，常被某些调速永磁同步电动机所采用，但漏磁系数和制造成本都较凸出式大。

(2) 内置式转子磁路结构。内置式结构的永磁体位于转子内部，永磁体外表面与定子铁心内圆之间有铁磁物质制成的极靴，极靴中可以放置铸铝笼或铜条笼，起阻尼或启动作用，动、稳态性能好，广泛用于要求有异步启动能力或动态性能高的永磁同步电动机。内置式转子内的永磁体受到极靴的保护，其转子磁路结构的不对称性所产生的磁阻转矩也有助于提高电动机的过载能力或功率密度，而且易于弱磁扩速。

按永磁体磁化方向与转子旋转方向的相互关系，内置式转子结构又可分为径向式、切向式和混合式3种，如图3.33所示。

径向式转子结构的永磁同步电动机的磁钢或者放在磁通轴的非对称位置上或同时利用径向和切向充磁的磁钢以产生高磁通密度。该结构的优点是漏磁系数小，转轴上不需


(a) 内置径向式


(b) 内置切向式


(c) 内置混合式

图 3.33 内置式转子结构

采取隔磁措施，极弧系数易于控制，转子冲片机械强度高，安装永磁体后转子不易变形等。

切向式转子结构的转子有较大的惯性，漏磁系数较大，制造工艺和成本较径向式有所增加。其优点是一个极距下的磁通由相邻两个磁极并联提供，可得到更大的每极磁通。尤其当电动机极数较多、径向式结构不能提供足够的每极磁通时，这种结构的优势就显得更为突出。此外，采用该结构的永磁同步电动机的磁阻转矩可占到总电磁转矩的40%，对提高电动机的功率密度和扩展恒功率运行范围都是很有利的。

混合式结构集中了径向式和切向式的优点，但结构和制造工艺都比较复杂，制造成本也比较高。

2. 永磁同步电动机的特点

永磁同步电动机与其他电动机相比，具有以下优点：

(1) 用永磁体取代绕线式同步电动机转子中的励磁绕组，从而省去了励磁线圈、集电环和电刷，以电子换向实现无刷运行，结构简单，运行可靠。

(2) 永磁同步电动机的转速与电源频率间始终保持准确的同步关系，控制电源频率就能控制电动机的转速。

(3) 永磁同步电动机具有较硬的机械特性，对于因负载的变化而引起的电动机转矩的扰动具有较强的承受能力，瞬间最大转矩可以达到额定转矩的3倍以上，适合在负载转矩变化较大的工况下运行。

(4) 永磁电动机转子为永久磁铁无需励磁，因此电动机可以在很低的转速下保持同步运行，调速范围宽。

(5) 永磁同步电动机与异步电动机相比，不需要无功励磁电流，因而功率因数高，定子电流和定子铜耗小，效率高。

(6) 体积小、质量轻。近些年来随着高性能永磁材料的不断应用，永磁同步电动机的功率密度得到很大提高，比起同容量的异步电动机来，体积和质量都有较大的减少，使其适合应用在许多特殊场合。

(7) 结构多样化，应用范围广。永磁同步电动机由于转子结构的多样化，产生了特点和性能各异的许多品种，从工业到农业，从民用到国防，从日常生活到航空航天，从简单电动工具到高科技产品，几乎无所不在。

永磁同步电动机还存在以下缺点：

(1) 由于永磁同步电动机转子为永磁体，无法调节，必须通过加定子直轴去磁电流分量来削弱磁场，这会增大定子的电流，增加电动机的铜耗。

(2) 永磁电动机的磁钢价格较高。

由此可见，永磁电动机体积小，质量轻，转动惯量小，功率密度高(可达 1kW/kg)，适合电动汽车空间有限的特点需要；另外，转矩惯量比大，过载能力强，尤其低转速时输出转矩大，适合电动汽车的起动加速。因此，永磁电动机得到国内外电动汽车界的广泛重视，并得到了普遍应用。

3.5.2 永磁同步电动机的运行原理与特性

1. 电枢反应

永磁同步电动机带负载时，气隙磁场是永磁体磁动势和电枢磁动势共同建立的。电枢磁动势对气隙磁场有影响，电枢磁动势的基波对气隙磁场的影响称为电枢反应。电枢反应不仅使气隙磁场波形发生畸变，而且还会产生去磁或增磁作用，因此，气隙磁场将影响永磁同步电动机的运行特性。

对永磁同步电动机进行分析时，需要采用双反应理论，即需要把电枢电流和电枢电动势分解成交轴和直轴两个分量。交轴电枢电流产生交轴电枢电动势，发生交轴电枢反应；直轴电枢电流产生直轴电枢电动势，发生直轴电枢反应。

2. 电压方程式

忽略磁饱和效应的影响，永磁同步电动机的电压方程式为

$$U=E_0+I_aR_a+jI_dX_d+jI_qX_q \tag{3-50}$$

式中，U 为电枢端电压；E_0 为励磁电动势；I_a 为电枢电流，$I_a=I_d+I_q$；I_d 为电枢电流在 d 轴的分量；I_q 为电枢电流在 q 轴的分量；R_a 为电枢绕组电阻；X_d 为直轴同步电抗；X_q 为交轴同步电抗。

3. 功率与转矩

当永磁同步电动机具有滞后功率因数并考虑电枢电阻的影响，电动机从电网输入的电功率为

$$\begin{aligned} P_1&=mUI_a\cos\varphi \\ &=\frac{mU[E_0(X_q\sin\theta-R_a\cos\theta)+R_aU+U(X_d-X_q)\sin2\theta/2]}{R_a^2+X_dX_q} \end{aligned} \tag{3-51}$$

式中，θ 为电动机的功率角。

电动机的电磁功率为

$$P_e=P_1-P_{cu\,a} \tag{3-52}$$

式中，$P_{cu\,a}$ 为电动机的电枢绕组铜耗。

如果忽略电枢电阻的影响，则



$$P_e=\frac{mE_0U}{X_d}\sin\theta+\frac{mU^2}{2}\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin 2\theta \qquad (3-53)$$

式(3-53)的前半部分称为基本电磁功率，由永磁磁场与电枢磁场相互作用产生；后半部分因凸极效应产生，称为附加电磁功率或磁阻功率。对于永磁同步电动机，充分利用磁阻功率，是提高电动机功率密度和效率的有效途径。

电磁功率与功率角的关系称为永磁同步电动机的功角特性，如图3.34所示。图中，曲线1为基本电磁功率；曲线2为磁阻功率；曲线3为合成电磁功率。如果把纵坐标改用转矩，则表示了电磁转矩与功率角之间的关系，称为永磁同步电动机的矩角特性。与基本电磁功率相对应的转矩分量称为基本电磁转矩，也称为永磁转矩；与磁阻功率相对应的转矩分量称为磁阻转矩。

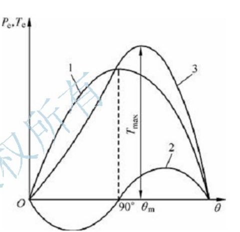


图3.34 永磁同步电动机的功角特性和矩角特性

4. 运行特性

永磁同步电动机的运行特性主要是机械特性和工作特性。

永磁同步电动机稳态正常运行时，转速始终保持同步速不变，因此，其机械特性为平行于横轴的直线，调节电源频率来调节电动机转速时，转速将严格地与频率成正比例变化，如图3.35所示。

永磁同步电动机的工作特性是指当电源电压恒定时，电动机的输入功率 P_1、电枢电流 I_a、效率 η、功率因数 $\cos\varphi$ 等随输出功率变化的关系，如图3.36所示。

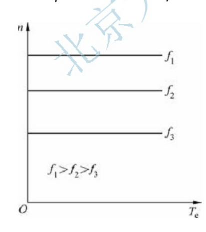


图3.35 永磁同步电动机的机械特性

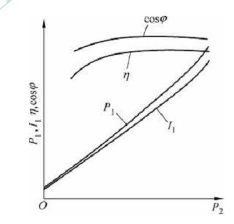


图3.36 永磁同步电动机的工作特性

可以看出，在正常工作范围内，永磁同步电动机的功率因数比较平稳，效率特性也能保持较高的水平。电动机的输入功率和电枢电流近似与输出功率成正比例。

3.5.3 永磁同步电动机的数学模型

永磁同步电动机的定子是三相对称绕组，按照电动机惯例规定各物理量的正方向。为了便于分析，假定以下条件成立：

(1) 磁路不饱和，电动机电感不受电流变化影响，不计涡流和磁滞损耗；

(2) 忽略齿槽、换相过程和电枢反应的影响；

(3) 电动机的反电动势是正弦的；

(4) 电动机各相绕组电阻相等 $R_A=R_B=R_C=R$；

(5) 转子上无阻尼绕组，永磁体也没有阻尼作用。

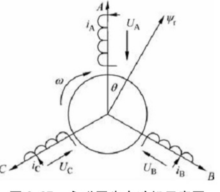


图 3.37　永磁同步电动机示意图

三相永磁同步电动机示意如图 3.37 所示，电动机极对数为 1。图中，定子三相绕组用 A、B、C 这 3 个线圈来表示；Ψ 为转子永磁体磁链的最大值，其方向为转子上安装永磁磁钢的磁场方向；电动机转子以 ω 的角速度顺时针方向旋转；θ 为 Ψ 和 A 相绕组间的夹角，$\theta=\omega t+\theta_0$，其中，θ_0 为 $t=0$ 时刻的夹角；u_A、u_B、u_C 分别为三相绕组的相电压瞬时值；i_A、i_B、i_C 分别为三相绕组的相电流瞬时值。

三相绕组的静止坐标系(ABC)电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} \tag{3-54}$$

式中，L_A、L_B、L_C 分别为电动机 ABC 三相绕组的电感；M_{AB}、M_{BA}、M_{BC}、M_{CB}、M_{CA}、M_{AC}分别为三相绕组之间的互感；Ψ_A、Ψ_B、Ψ_C 分别为永磁体磁链在各相绕组中的投影；$P=\mathrm{d}/\mathrm{d}t$ 为微分算子。

永磁同步电动机在三相静止坐标系下的电压方程为一组变系数的线性微分方程，不易直接求解。常用更为简单的等效的原型电动机来替代实际电动机，并使用坐标变化方法，以方便分析和求解。

通过坐标变换，可以将永磁同步电动机在 ABC 三相静止坐标系下的电压电流量变换到转子坐标系下。由此可以得

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-2\pi/3) & \cos(\theta-4\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta-4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \tag{3-55}$$

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \sin(\theta-2\pi/3) & \sin(\theta-2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta-4\pi/3) & \sin(\theta-4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} \tag{3-56}$$

电磁转矩方程为

$$T_e = p_n(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) = p_n[\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{3-57}$$

式中，p_n 为电动机磁极对数；Ψ_f 为永磁体产生的磁链；L_d、L_q 为直交流电感；i_d、i_q 为直交流电流。

定子电流空间矢量 i_s 与定子磁链空间矢量 Ψ_s 同相，且定子磁链与永磁体产生的气隙

磁场间的空间角度为β，则

$$\begin{aligned} i_d &= i_s\cos\beta \\ i_q &= i_s\sin\beta \end{aligned} \tag{3-58}$$

将式(3－58)代入式(3－57)得

$$T_e = p_n\Psi_f i_s\sin\beta + \frac{1}{2}p_n(L_d - L_q)i_s^2\sin2\beta \tag{3-59}$$

由式(3－59)可以看出，永磁同步电动机输出转矩中包含两个分量，第一项是由两磁场互相作用所产生的电磁转矩，第二项是由凸极效应引起，并与两轴电感参数的差值成正比的磁阻转矩。

3.5.4 永磁同步电动机的控制

为了提高永磁同步电动机控制系统性能，使其具有更快的响应速度和更高的转速精度以及更宽的调速范围，其动、静响应能够与直流电动机系统相媲美，提出了各种新型控制策略用于永磁同步电动机控制。

1. 恒压频比开环控制

恒压频比开环控制(VVVF)的控制变量为电动机的外部变量即电压和频率。控制系统将参考电压和频率输入到实现控制策略的调制器中，最后由逆变器产生一个交变的正弦电压施加在电动机的定子绕组上，使之运行在指定的电压和参考频率下。按照这种控制策略进行控制，使供电电压的基波幅值随着速度指令成比例的线性增长，从而保持定子磁通的近似恒定。VVVF控制策略简单，易于实现，转速通过电源频率进行控制，不存在异步电动机的转差和转差补偿问题。但同时，由于系统中不引入速度、位置等反馈信号，因此无法实时捕捉电动机状态，致使无法精确控制电磁转矩；在突加负载或者速度指令时，容易发生失步现象；也没有快速的动态响应特性。因此，恒压频比开环控制，只是控制电动机磁通而没有控制电动机的转矩，控制性能差，通常只用于对调速性能要求一般的通用变频器上。

2. 矢量控制

矢量控制理论的基本思想为，以转子磁链旋转空间矢量为参考坐标，将定子电流分解为相互正交的两个分量，一个与磁链同方向，代表定子电流励磁分量，另一个与磁链方向正交，代表定子电流转矩分量，分别对其进行控制，获得与直流电动机一样良好的动态特性。因其控制结构简单，控制软件实现较容易，已被广泛应用到调速系统中。

永磁同步电动机矢量控制策略与异步电动机矢量控制策略有些不同。由于永磁同步电动机转速和电源频率严格同步，其转子转速等于旋转磁场转速，转差恒等于零，没有转差功率，控制效果受转子参数影响小。因此，在永磁同步电动机上更容易实现矢量控制。

由于永磁同步电动机输出电磁转矩对应多个不同的交、直轴电流组合，不同组合对应着不同的系统效率、功率因素以及转矩输出能力，因此永磁同步电动机有不同的电流控制策略。

(1) $i_d=0$控制，也称为磁场定向控制。目前，在永磁同步电动机伺服系统中，$i_d=0$矢量控制是主要的控制方式。通过检测转子磁极空间位置d轴，控制逆变器功率开关器件导通与关断，使定子合成电流为位于q轴，此时d轴定子电流分量为零，永磁同步电动机

电磁转矩正比于转矩电流，即正比于定子电流幅值，只需控制定子电流大小就可以很好地控制永磁同步电动机的输出电磁转矩。

(2) 最大转矩/电流比控制。在电动机输出相同电磁转矩下使电动机定子电流最小的控制策略称为最大转矩/电流比控制。

最大转矩/电流比控制实质是求电流极值问题，可以通过建立辅助方程，采用牛顿迭代法求解。但是，计算量较大，在实际应用中系统实时性无法满足，只有通过离线计算出不同电磁转矩对应的交、直轴电流，以表的形式存放于 DSP 中，实际运行时根据负载情况查表求得对应的 i_d、i_q 进行控制。

(3) 弱磁控制。永磁同步电动机弱磁控制思想来自他励直流电动机调磁控制。对于他励直流电动机，当其电枢端电压达到最高电压时，为使电动机能运行于更高转速，采取降低电动机励磁电流的方法，以平衡电压。在永磁同步电动机电压达到逆变器所能输出的电压极限后，要想继续提高转速，也要采取弱磁增速的办法。

永磁同步电动机励磁磁动势由永磁体产生，无法像他励直流电动机那样通过调节励磁电流实现弱磁。传统方法是通过调节定子电流 i_d 和 i_q，增加定子直轴去磁电流分量实现弱磁升速。为保证电动机电枢电流幅值不超过极限值，转矩电流分量 i_q 应随之减小，因此这种弱磁控制过程本质上就是在保持电动机端电压不变情况下减小输出转矩的过程，永磁同步电动机直轴电枢反应比较微弱，因此需要较大的去磁电流才能起到去磁增速作用。在电动机工作在额定电流情况下，去磁电流的增加有限，因此采用这种方法所能得到的弱磁增速范围也是有限的。

图 3.38 是某电动汽车用永磁同步电动机矢量控制系统框图。从图 3.38 可知，通过分别比较控制永磁同步电动机的电流实际值 i_d、i_q 与给定值 i_d^* 、i_q^*，实现其转速和转矩控制。并且，i_d 和 i_q 独立控制，便于实现各种先进的控制策略。

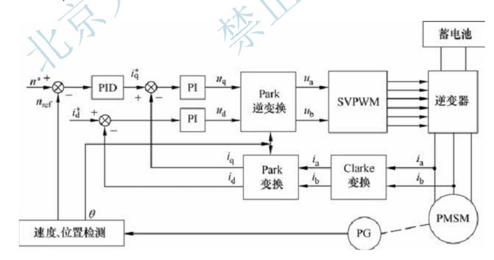


图 3.38　永磁同步电动机矢量控制系统框图

根据永磁同步电动机的具体应用的要求不同，可以采用的控制方法主要有：$i_d=0$ 控制、$\cos\varphi=1$ 控制、恒磁链控制、最大转矩/电流控制、弱磁控制、最大输出功率控制等。当电动汽车正常行驶时，电动机转速处于基速以下运行，在定子电流给定的情况下，$i_d=0$ 的电磁转矩 $T_e=p_n\Psi_f i_q$，这样只要控制 i_q 的大小就能控制转速和转矩，实现矢量控制；当电动机转速在基速以上时，由于永磁体的励磁磁链为常数，电动机感应电动势随着电动机转

速成正比增加，电动机感应电压也跟随提高，但是电动机相电压和相电流的有效值的极限值受到与电动机端相连的逆变器的直流侧电压和逆变器的最大输出电流的限制，所以必须进行弱磁升速。通过控制 i_d 来控制磁链，通过控制 i_q 来控制转速，实现矢量控制。在实际控制中，i_d、i_q 不能直接被检测，所以必须通过实时检测到的三相电流和电动机转子位置经坐标变换得到。

但矢量控制本身也存在一定的缺陷：

(1) 转子磁链的准确观测存在一定的难度，转子磁链的计算对电动机的参数有较强的依赖性，因此对参数变化较为敏感。为了克服这一问题，出现了多种参数辨识方法，但这些方法进一步增加了系统的复杂性。

(2) 由于需要进行解耦运算，采用了矢量旋转变换，系统计算比较复杂。

但是，PMSM 矢量控制系统能实现高精度、高动态响应性能和大范围的调速或伺服控制。随着工业领域对高性能伺服系统需求的不断增加，尤其是数控、机器人等方面技术的发展，PMSM 矢量控制系统作为一种相对比较成熟的控制策略具有广阔的应用前景。

3. 直接转矩控制

PMSM 直接转矩控制系统的原理结构图，如图 3.39 所示。实际系统中，开关信号是由转矩和定子磁链的给定值与反馈值的偏差经滞环比较得到的。而转矩和定子磁链的给定值是由电磁转矩和定子磁链估算模型计算得到的。

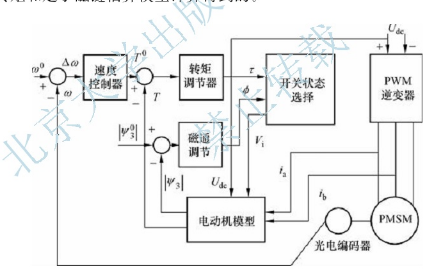


图 3.39 PMSM 直接转矩控制系统结构

根据直接转矩控制系统结构，可以得到其控制过程：对于逆变器输出的三相电流 i_A、i_B、i_C 通过 3/2 变换得到 i_α、i_β；由逆变器的电压状态与逆变器的开关状态以及直流电压 V_{dc}之间的关系，可以得到 u_α、u_β。由磁链模型得到磁链在 $\alpha\beta$ 坐标系上的分量 Ψ_α、Ψ_β，再由 Ψ_α、Ψ_β、i_α、i_β 通过转矩模型，得到转矩 T，与 PI 速度调节器输出的转矩给定 T^* 进行滞环比较，输出结果用来决定开关状态。把 Ψ_α、Ψ_β 求平方和，得到的 $|\Psi_s|$ 与磁链给定 Ψ_s^* 进行比较，由滞环比较器输出结果。同时利用 Ψ_α、Ψ_β 判断磁链所在区域，确定 θ 值，综合调节器的输出以及 θ 值，合理选择开关矢量以确定逆变器的开关状态。

直接转矩控制不需要传统矢量控制里复杂的旋转坐标变换和转子磁链定向，转矩取代电流成为受控对象，电压矢量则是控制系统唯一的输入，直接控制转矩和磁链的增加或减



小，但是转矩和磁链并不解耦，对电动机模型进行简化处理，没有 PWM 信号发生器，控制结构简单，受电动机参数变化影响小，能够获得极佳的动态性能。

4. 智能控制

为了提高永磁同步电动机的控制性能和控制精度，模糊控制、神经网络控制等开始应用于同步电动机的控制。

采用智能控制方法的永磁同步电动机控制系统，在多环控制结构中，智能控制器处于最外环充当速度控制器，而内环电流控制、转矩控制仍采用 PI 控制、直接转矩控制这些方法。这主要是因为外环是决定系统的根本因素，而内环主要的作用是改造对象特性以利于外环的控制。各种扰动给内环带来的误差可以由外环控制或抑制。

在永磁同步电动机系统中应用智能控制时，也不能完全摒弃传统的控制方法，必须将两者很好地结合起来，才能彼此取长补短，使系统的性能达到最优。

3.5.5 永磁同步电动机控制系统仿真

以磁场定向控制和弱磁控制为例，进行永磁同步电动机控制系统的仿真。

1. 永磁同步电动机控制系统仿真模型的建立

永磁同步电动机磁场定向控制原理如图 3.40 所示。

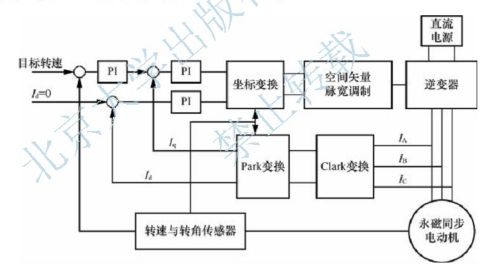


图 3.40 永磁同步电动机磁场定向控制原理框图

永磁同步电动机磁场定向控制系统仿真模型如图 3.41 所示，主要包括电动机和三相逆变电压源模块、速度和电流的 PI 调节模块、坐标变换模块、参考空间电压矢量的生成模块及 SVPWM 仿真模块等。

永磁同步电动机弱磁控制的原理如图 3.42 所示。

永磁同步电动机弱磁控制系统仿真模型如图 3.43 所示。

两种控制模型主要模块都相同，不同的是弱磁控制模型加入了直轴电流的计算模块。其中，永磁同步电动机与逆变器模块采用了 SimPowerSystem 库中的永磁同步电动机与逆变器模型。永磁同步电动机模型包括三相电流和负载转矩的输入端口，电动机本身的电阻、电感等参数都可以根据实际电动机参数进行修改，电动机转速、转矩、三相电流和转子角度都可以通过电动机测量模块得到。

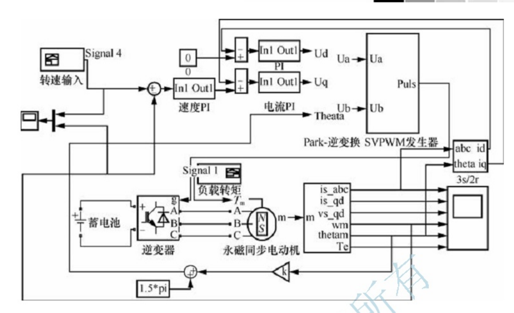


图 3.41 永磁同步电动机磁场定向控制系统仿真模型

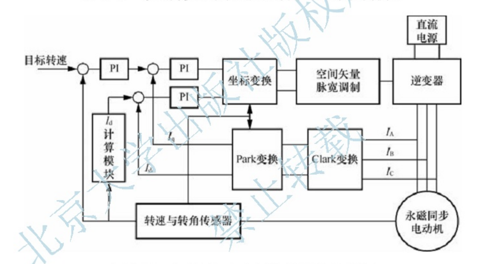


图 3.42 永磁同步电动机弱磁控制原理框图

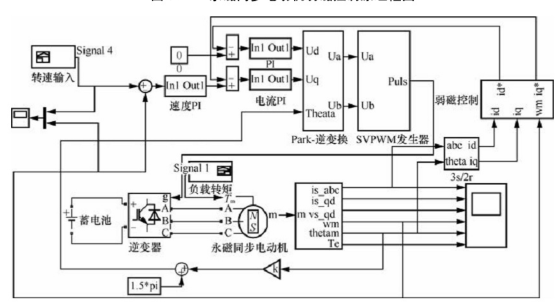


图 3.43 永磁同步电动机弱磁控制系统仿真模型

坐标变换模块通过 Park 逆变换，将由速度 PI 调节器得到的给定直轴与交轴电流转化为空间脉宽调制所需的空间参考电压矢量，如图 3.44 所示。

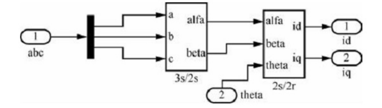


图 3.44 坐标变换模块

SVPWM 仿真模块是空间脉宽调制的主要实现模块，根据给定的空间参考电压矢量生成所需的逆变器 PWM 驱动信号，控制逆变器产生的三相电流，从而实现对电动机的控制。SVPWM 仿真模块主要包括扇区判断模块、电压矢量切换点计算模块、生成 PWM 模块等，如图 3.45 所示。

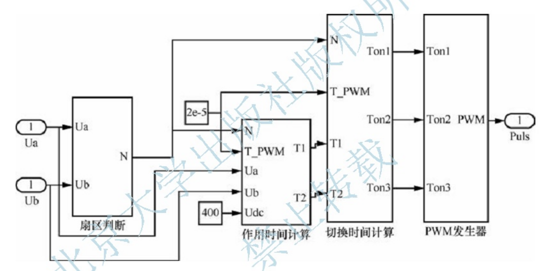


图 3.45 SVPWM 仿真模块

2. 永磁同步电动机性能仿真

在实际设计电动汽车驱动电动机时，常用实验测得的电动机的效率 Map 图来对电动机的区域性能进行评价，然后再对电动机参数进行修改，这样就使设计效率大大降低。为了提高设计效率、节约设计成本，在设计之初就应该引入电动机控制策略对电动机的工作性能进行计算，得到电动机的效率 Map 图。

永磁同步电动机的主要参数有：电枢绕组相电阻为 0.021Ω，磁链为 0.1688H，直轴电感为 0.00126H，交轴电感为 0.00056H，电动机极对数为 4，转动惯量为 0.043 kgm^2，电动机摩擦系数为 0.00048Nm・s。

为了模拟汽车在负载下起动的过程，设定永磁同步电动机在 50N・m 恒定不变的负载转矩下，由静止起动加速度到 3000r/min 时电动机转速的波形如图 3.46 所示，汽车由静止开始平稳加速，大约在 0.06s 时电动机转速达到 3000r/min，其后保持稳定。

电机转矩和三相电流波形分别如图 3.47 和图 3.48 所示，加速过程中，电动机平均转矩大约为 120N・m，相应的三相电流幅值在 100A 左右，转矩波动较大。0.06s 后，随着电动机转速达到预期转速，电动机转矩也稳定在 50N・m 左右，三相电流最大幅值在 45A

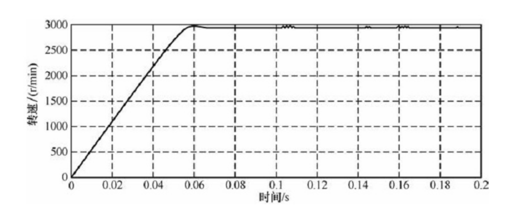


图 3.46 负载起动工况下电动机的转速波形

左右，此时电动机转矩波动较小。

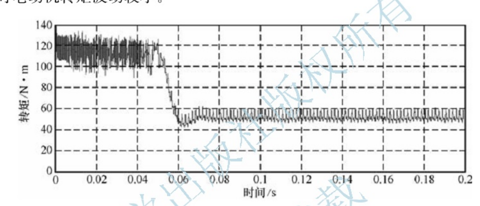


图 3.47 负载起动工况下电动机的转矩波形

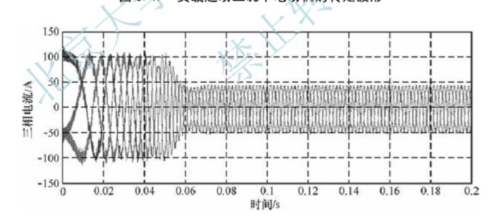


图 3.48 负载起动工况下电动机的三相电流波形

为模拟电动汽车加速的过程，在电动机转速由 1000r/min 增加到 2500r/min 时，负载转矩逐渐由 50N·m 增加到 80N·m，持续运行一段时间后永磁同步电动机转矩由 80N·m 突然增加到 120N·m 模拟了电动汽车爬坡的过程。

电动机在汽车加速爬坡的整个过程中转速波形图如图 3.49 所示，电动机初始转速为 1000r/min，由 0.1s 开始平稳加速，0.3s 时达到 2500r/min 并保持不变，0.4s 时由于负载转矩增加，电动机转速逐步下降。

电动机转矩和三相电流波形分别如图 3.50 和图 3.51 所示，0.1s 时，随着电动机加速，电动机提供的转矩也逐步增大，相应的三相电流也逐步增加。由于转速增加，三相电流的频率也逐步升高。0.4s 后，负载转矩突然从 80N·m 增加到 120N·m，相应的三相

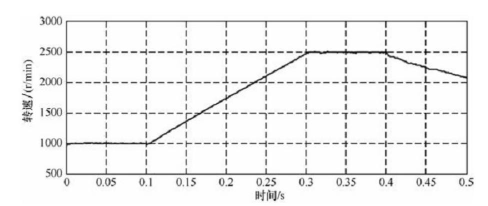


图 3.49　加速爬坡工况下电动机的转速波形

电流的幅值也由 70A 增加到 110A 左右。

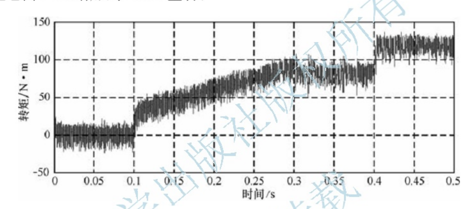


图 3.50　加速爬坡工况下电动机的转矩波形

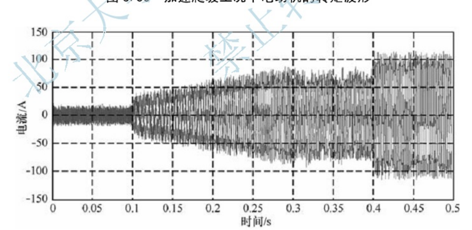


图 3.51　加速爬坡工况下电动机的三相电流波形

可以看出，控制系统响应较快，在 50N·m 的负载转矩下可以平稳起动，加速和爬坡过程中转矩转速都较平稳，没有出现明显振荡。速度增加时，三相电流频率变快，负载转矩变大时，电流幅值变大，变化趋势均与实际相符。

通过对电动机不同转速、转矩下工作状态的仿真，可以方便地计算出不同转速、转矩下对应的电动机输入功率与输出功率，从而计算得到相应的电动机效率。通过这种方法，在电动机设计进入实验验证前期便可以引入不同的控制策略，并且计算绘制相应控制策略下的电动机效率 Map 图。将得到的结果引入整车性能仿真软件中评价电动机在整个运行区域内的工作性能，并以此优化相关的电动机性能参数，尽可能使电动机工作在高效区。

磁场定向控制下的电动机效率 Map 图如图 3.52 所示。

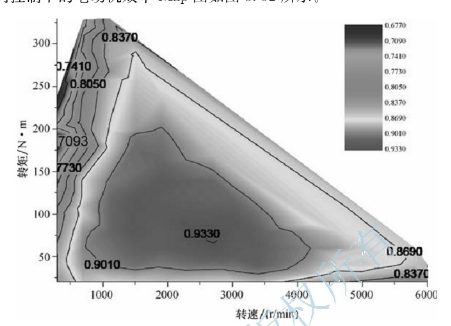


图 3.52　磁场定向控制下的电动机效率 Map 图

弱磁控制下的电动机效率 Map 图如图 3.53 所示。

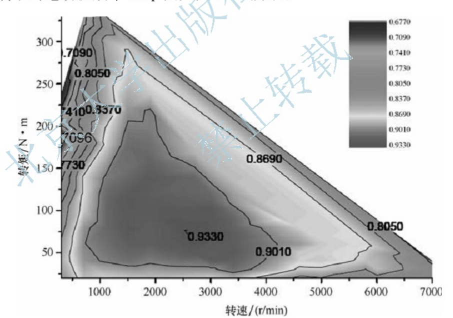


图 3.53　弱磁控制控制下的电动机效率 Map 图

对比两图不难看出，加入弱磁控制后，电动机可运行的最高转速提高到了 7000r/min，而且部分工况下电动机的效率也有所提高。可见，合理的控制策略对改善电动机的运行性能有很大帮助。加入弱磁控制后，电动机在 1000～4000r/min 时的效率基本都在 90%以上，且最高效率达到 95%以上，电动机的转矩和最高转速也都能满足使用要求。

3.6 开关磁阻电动机

开关磁阻电动机(Switched Reluctance Motor，SRM)是继直流电动机和交流电动机之后，又一种极具发展潜力的新型电动机。

3.6.1 开关磁阻电动机的结构与特点

1. 开关磁阻电动机的结构

开关磁阻电动机由双凸极的定子和转子组成，其定子、转子的凸极均由普通的硅钢片叠压而成。定子极上绕有集中绕组，把沿径向相对的两个绕组串联成一个两级磁极，称为“一相”；转子既无绕组又无永磁体，仅由硅钢片叠成。

开关磁阻电动机有多种不同的相数结构，如单相、二相、四相及多相等，且定子和转子的极数有多种不同的搭配。定子和转子极数组合方案见表3-2。

表3-2 SR电动机的极数组合

相　　数	3	4	5	6	7	8	9
定子极数	6	8	10	12	14	16	18
转子极数	4	6	8	10	12	14	16
步进角/(°)	30	15	9	9	4.25	3.21	2.5

低于三相的开关磁阻电动机一般没有自起动能力。相数多，有利于减小转矩脉动，但导致结构复杂、主开关器件多、成本增高。目前应用较多的是四相8/6极结构和三相6/4极结构。下面介绍的开关磁阻电动机的结构为四相8/6极结构。

2. 开关磁阻电动机的特点

开关磁阻电动机与其他电动机相比，具有以下优点。

(1) 可控参数多，调速性能好。可控参数有主开关开通角、主开关关断角、相电流幅值、直流电源电压，控制方便，可四象限运行，容易实现正转、反转和电动、制动等特定的调节控制。

(2) 结构简单，成本低。开关磁阻电动机转子无绕组，也不加永久磁铁，定子为集中绕组，比传统的直流电动机、永磁电动机及感应电动机都简单，制造和维护方便；它的功率变换器比较简单，主开关元件数较少，电子器件少，成本低。

(3) 损耗小，运转效率高。开关磁阻电动机的转子不存在励磁及转差损耗，功率变换器元器件少，相应的损耗也小；控制灵活，易于在很宽转速范围内实现高效节能控制。

(4) 起动转矩大，起动电流小。在15%额定电流的情况下就能达到100%的起动转矩。

由于开关磁阻电动机的特殊结构和工作方式的原因，其也存在如下一些缺点。

(1) 转矩脉动现象较大；

(2) 振动和噪声相对较大，特别是在负载运行的时候；

(3) 电动机的出线头相对较多，还有位置检测器出线端；

(4) 电动机的数学模型比较复杂，其准确的数学模型较难建立；

(5) 控制复杂，且依赖于电动机的结构。

3.6.2 开关磁阻电动机工作原理与运行特性

1. 开关磁阻电动机的工作原理

开关磁阻电动机的工作原理示意如图 3.54 所示。图中，S_1、S_2 是电子开关；VD_1、VD_2 是二极管，U 是直流电源。

电动机的定子和转子呈凸极形状，极数互不相等。转子由叠片构成，带有位置检测器，以提供转子位置信号。使定子绕组按一定的顺序通断，可保持电动机的连续运行。

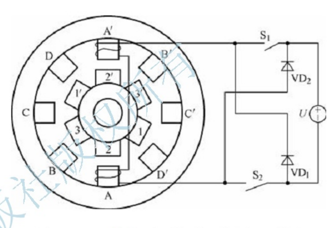


图 3.54 开关磁阻电动机的工作原理示意图

开关磁阻电动机的磁阻随着转子磁极与定子磁极的中心线对准或错开而变化。因为电感与磁阻成反比，所以当转子磁极在定子磁极中心线位置时，相绕组电感最大；当转子磁极中心线对准定子磁极中心线时，相绕组电感最小。

因为开关磁阻电动机的运行原理遵循“磁阻最小原理”——磁通总要沿着磁阻最小的路径闭合，所以具有一定形状的铁心在移动到最小磁阻位置时，必须使自己的主轴线与磁场的轴线重合。由图 3.54 可看出，当定子 D－D′极励磁时，所产生的磁力则力图使转子旋转到转子极轴线 1－1′与定子极轴线 D－D′重合的位置，并使 D 相励磁绕组的电感最大。若以图中定、转子所处的相对位置作为起始位置，则依次给 D－A－B－C 相绕组通电，转子即会逆着励磁顺序以逆时针方向连续旋转；反之，若依次给 B－A－D－C 相通电，则电动机即会沿着顺时针方向转动。所以开关磁阻电动机的转向与相绕组的电流方向无关，而仅取决于相绕组通电的顺序。

2. 开关磁阻电动机的运行特性

开关磁阻电动机运行特性可分为 3 个区域：恒转矩区、恒功率区、自然特性区(串励特性区)，如图 3.55 所示。

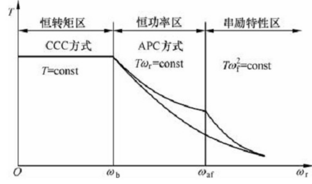


图 3.55 SR 电动机的运行特性图

开关磁阻电动机一般运行在恒转矩区和恒功率区。在这两个区域内，电动机的实际运行特性可控。通过控制条件，可以实现在实线以下的任意实际运行特性。

在恒转矩区，电动机转速较低，电动机反电动势小，因此需采用电流斩波控制(CCC)方式。

在恒功率区，旋转电动势较大，开关器件导通的时间较短，因此电流较小。当

外加电压和开关角一定的条件下，随着角速度的增加，转矩急剧下降，此时可采用角度位置控制(APC)方式，通过按比例地增大导通角来补偿，延缓转矩的下降速度。

在串励特性区，电动机的可控条件都已达极限，运行特性不再可控，呈现自然串励运行特性。因此电动机一般不运行在此区域。

电动机运行时存在着第一、第二两个临界运行点，采用不同的可控条件匹配可得到两个临界点的不同配置，从而得到各种各样所需的机械特性。

临界运行点对应的转速称为临界转速，是开关磁阻电动机运行和设计时要考虑的重要参数。第一临界转速是开关磁阻电动机开始运行于恒功率特性的临界转速，定义为开关磁阻电动机的额定转速，对应的功率即为额定功率；第二临界转速是能得到额定功率的最高转速，是恒功率特性的上限，可控条件都达到了极限，当转速再增加时，输出功率将下降。

3.6.3 开关磁阻电动机的数学模型

开关磁阻电动机数学模型通常有线性模型、准线性模型(分段线性模型)和非线性模型等。

1. 开关磁阻电动机的线性模型

线性模型比较简单，忽略了电磁饱和、涡流、磁滞、边缘效应、相间的互感等非线性因素影响。由于不考虑非线性因素，绕组的电感只与定子和转子的相对位置有关，与相电流的大小无关。这样，就能较容易地得出磁链和转矩的简易解析式，分析开通角和关断角等参数对电动机运行特性的影响规律，从而找到最佳的控制策略，使电动机满足运行要求。但这种线性模型与开关磁阻电动机的实际特性存在很大的出入，对电动机参数的计算求解的精度比较低，运用在实际中误差就会较大，因此，只适于作为分析电动机工作特性和参数间相互关系的理论依据。

1）基本方程

当恒定直流电源给开关磁阻电动机供电时，其电压方程为

$$U_s = Ri + \frac{d\Psi}{dt} \tag{3-60}$$

式中，U_s 为电源电压；R 为绕组电阻；i 为绕组电流；Ψ 为绕组磁链。

绕组磁链与绕组电流和转子位置有关，即

$$\Psi = \Psi(i, \theta) = L(\theta)i \tag{3-61}$$

式中，θ 为转子位置角；L 定子绕组电感。

由式(3-60)和式(3-61)可得

$$U_s = Ri + L(\theta)\frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta)}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} \tag{3-62}$$

式(3-62)中，第一项为电阻压降，第二项为变压器电势，第三项为旋转电势。电阻压降与旋转电势相比很小，可忽略不计，故可将式(3-60)简化为

$$\pm U_s = \frac{d\Psi}{dt} = L\frac{di}{dt} + i\frac{dL}{d\theta}\omega \tag{3-63}$$

式中，ω 为电动机角速度；“+”对应绕组通电阶段；“-”对应续流阶段。

在绕组通电期间，功率平衡方程式为

$$W_s=\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}Li^2\right)+i^2\frac{dL}{d\theta}\omega \tag{3-64}$$

式(3-64)表明，当开关磁阻电动机绕组通电时，若不计绕组损耗，输入的电能一部分储存在绕组中，另一部分则转换为机械功率输出。

根据力学原理，电动机的转矩平衡方程式为

$$T_e=J\frac{d\omega}{dt}+K_T\omega+T_L=J\frac{d^2\theta}{dt^2}+K_T\frac{d\theta}{dt}+T_L \tag{3-65}$$

式中，T_e 为电磁转矩；J 为电动机转动惯量；K_T 为阻尼因数；T_L 为负载转矩。

电动机的电磁转矩也可以通过磁共能和转子位置求得，即

$$T_e=\frac{\partial W(i,\ \theta)}{\partial \theta} \tag{3-66}$$

式中，W 为磁共能。

2）绕组电感

图 3.56 所示为线性模型中定子绕组电感与转子位置角的关系曲线。图中，横坐标为转子位置角 θ，纵坐标为相绕组电感 L；原点对应于定子凸极中心线与转子极间中心线重合的位置；θ_1 为转子凸极后沿与定子凸极前沿重合处；θ_2 为转子凸极的前沿与定子凸极的后沿重合处；θ_3 为转子凸极的前沿与定子凸极的前沿重合处；θ_4 为转子凸极的后沿与定子凸极的后沿重合处；θ_5 与 θ_1 重合。

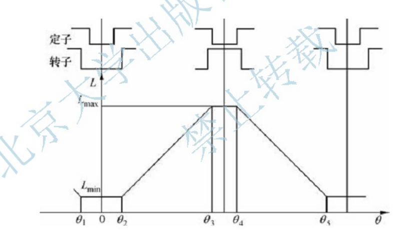


图 3.56 相电感与转子位置的关系

在 $\theta_1\sim\theta_2$ 区域内，定子凸极与转子槽相对，此时磁阻恒为最大，电感保持最小值 L_{min} 不变。

在 $\theta_2\sim\theta_3$ 区域内，转子转过 θ_2 后，相电感便开始线性上升，直到 θ_3 为止，这时定、转子凸极全部重合，磁阻恒为最小，相绕组电感变为最大值 L_{max}。

在 $\theta_3\sim\theta_4$ 区域内，由于转子极弧 β_r 通常要求大于定子极弧 β_s，因此，定、转子凸极保持全部重叠，相应的定、转子凸极间磁阻恒为最小值 L_{min}，相电感保持在最大值 L_{max}。

在 $\theta_4\sim\theta_5$ 区域内，转子转过 θ_4 后，相电感开始线性地下降，直到 θ_5 处降为 L_{min}。

由图 3.42 可得开关磁阻电动机任意一相绕组电感方程为

$$L(\theta)=\begin{cases} L_{\min} & \theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2 \\ L_{\min}+K(\theta_1-\theta_2) & \theta_2<\theta\leqslant\theta_3 \\ L_{\max} & \theta_3<\theta\leqslant\theta_4 \\ L_{\max}-K(\theta-\theta_4) & \theta_4<\theta\leqslant\theta_5 \end{cases} \tag{3-67}$$

式中，$K=(L_{\max}-L_{\min})/(\theta_3-\theta_2)=(L_{\max}-L_{\min})/\beta_s$，$\beta_s$ 称为定子磁极极弧。

3）电磁转矩

当电流为一恒定值时，电磁转矩为

$$T_e=\frac{\partial W'(i,\ \theta)}{\partial\theta}\bigg|_{i=\text{const}}=\frac{1}{2}i^2\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}\theta} \tag{3-68}$$

由式(3-67)和式(3-68)得电磁转矩为

$$T_e=\begin{cases} 0 & \theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2 \\ Ki^2/2 & \theta_2<\theta\leqslant\theta_3 \\ 0 & \theta_3<\theta\leqslant\theta_4 \\ -Ki^2/2 & \theta_4<\theta\leqslant\theta_5 \end{cases} \tag{3-69}$$

由式(3-69)可知，若在电感上升区域 $\theta_2\sim\theta_3$ 内给绕组通电，则产生电磁转矩；若在 $\theta_1\sim\theta_2$ 和 $\theta_3\sim\theta_4$ 区域内给绕组通电，则电磁转矩为零。若电流在电感下降区域 $\theta_4\sim\theta_5$ 内流动，电磁转矩为负值，产生制动转矩。

总结开关磁阻电动机的线性转矩模型，可得以下结论：

(1) 电磁转矩是由于转子转动时气隙磁导变化产生的，电感对位置角的变化率越大，电动机转矩越大，因此电动机转子极数小于定子极数，有利于增大电感相对转子位置的变化率。

(2) 电磁转矩大小与电流二次方成正比，可通过增大电流有效地增加转矩。

(3) 电磁转矩的方向与导通时定、转子的相对位置有关，因此，可通过改变绕组通电时刻改变电动机转向，而改变电流方向不会改变转矩的方向。

(4) 由于在电感下降阶段，电磁转矩为制动性质的转矩，因此主开关器件的关断不能太迟，应根据控制策略选择一个合适的值。

4）绕组电流

式(3-63)可改写为

$$\frac{\pm U_s}{\omega}=L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}\theta}+i\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} \tag{3-70}$$

设开通角为 θ_{on}，关断角为 θ_{off}，若已知初始条件 $i_0=0$，$\theta_0=\theta_{\text{on}}$，则根据式(3-69)和式(3-70)可得绕组电流，即

$$i(\theta)=\begin{cases} \dfrac{U}{L_{\min}}\dfrac{\theta-\theta_{\text{on}}}{\omega} & \theta_1\leqslant\theta<\theta_2 \\ \dfrac{U(\theta-\theta_{\text{on}})}{\omega[L_{\min}+K(\theta-\theta_2)]} & \theta_2\leqslant\theta\leqslant\theta_{\text{off}} \\ \dfrac{U(2\theta_{\text{off}}-\theta_{\text{on}}-\theta)}{\omega[L_{\min}+K(\theta-\theta_2)]} & \theta_{\text{off}}<\theta<\theta_3 \\ \dfrac{U(2\theta_{\text{off}}-\theta_{\text{on}}-\theta)}{\omega L_{\max}} & \theta_3\leqslant\theta<\theta_4 \end{cases} \tag{3-71}$$

由式(3-71)可知，在 $\theta_1\leqslant\theta<\theta_2$ 区域，$\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta=U_s/(\omega L_{\min})$，当 ω 在一定小范围变化

时，可认为 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta=\mathrm{const}$，即电流线性上升。这是由于在此区域绕组电感最小，对绕组电流限制能力小。若减小 θ_{on}，则绕组电流的幅值将相应地增加，因此，为了使电动机在电感上升区有足够的电流来产生转矩，可适当减小 θ_{on}。

在 $\theta_2\leqslant\theta\leqslant\theta_{off}$ 区域，根据电流方程，可知

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}\theta}=\frac{U[L_{min}+K(\theta_{on}-\theta_2)]}{\omega[L_{min}+K(\theta-\theta_2)^2]} \tag{3-72}$$

根据 θ_{on} 取值的不同，式(3-72)又可分为以下3种情况。

(1) 若 $\theta_{on}<\theta_2-L_{min}/K$，则 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta<0$，即绕组电流在进入电感上升区时会开始下降。这是因为 θ_{on} 过小，绕组电流在 θ_2 时将有较大的数值，造成旋转电动势引起的压降超过了电源电压 U_s；

(2) 若 $\theta_{on}=\theta_2-L_{min}/K$，则 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta=0$，即绕组电流在进入电感上升区时会保持不变；

(3) 若 $\theta_{on}>\theta_2-L_{min}/K$，则 $\mathrm{d}i/\mathrm{d}\theta>0$，即绕组电流在进入电感上升区时会继续上升。

在 $\theta_{off}<\theta<\theta_3$ 区域，此时绕组电流处于续流过程。为使电流在到达 θ_3 时降为0，可将初始条件 $i(\theta_3)=0$ 代入式(3-71)，即

$$\theta_{off}=(\theta_{on}+\theta_3)/2 \tag{3-73}$$

随着 θ_{off} 取值的不同，绕组电流波形也将不同。若要使电动机不产生制动转矩，必须保证续流电流在电感达到最大值之前降为零。则 θ_{off} 的取值应满足如下要求：

$$\theta_{off}<(\theta_{on}+\theta_3)/2 \tag{3-74}$$

2. 开关磁阻电动机的准线性模型

准线性模型采用分段线性化的方法描述电动机的电磁特性曲线。它的数学表达式也相对简单。因为在磁链的饱和区和非饱和区有不同的线性变化率，为了近似地考虑磁路的饱和效应、边缘效应，可将实际的非线性磁化曲线进行分段的线性化处理，同时不考虑相间的耦合效应，这样就可以用解析式来表示每段的磁化曲线，一般可将 Ψ-i 曲线分为两段(线性区和饱和区)或三段(线性区、低饱和区和高饱和区)。

为了便于实现，采用一般常见的两段线性化分法，将磁化特性曲线分为非饱和段和饱和段。非饱和段的曲线斜率为电感 $L(i,\theta)$ 的不饱和值；饱和段曲线可视为与 $\theta=0$ 位置的非饱和特性曲线平行，其斜率为 L_{min}，如图3.57所示。

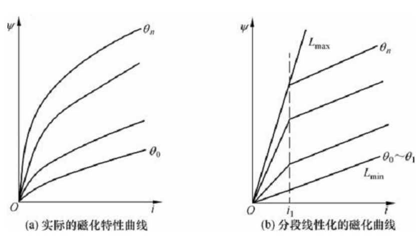


图3.57 磁化特性曲线

根据磁化曲线分段线性化的规则，结合电感线性化特性曲线 $L(\theta)$，可以得出绕组电感 $L(i,\theta)$ 的分段解析表达式为

$$L(i,\theta)=\begin{cases} L_{\min} & (\theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\min}+K(\theta-\theta_2) & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\min}+K(\theta-\theta_2)\dfrac{i_1}{i} & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_2<\theta\leqslant\theta_3) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\max} & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\min}+\dfrac{i_1(L_{\max}-L_{\min})}{i} & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_3<\theta\leqslant\theta_4) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\max}-K(\theta-\theta_4) & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\min}+\dfrac{L_{\max}-L_{\min}-K(\theta-\theta_4)}{i} & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_4<\theta\leqslant\theta_5) \end{cases} \tag{3-75}$$

式中，电流 i_1 的值一般由定转子凸极对准位置时的磁化曲线 $\Psi=f(i,\theta)\big|_{\theta=\pi/N_r}$ 决定，取磁化曲线开始弯转处的电流。

由 $\Psi(i,\theta)=L(i,\theta)i(\theta)$ 和电感的解析式，可以得到绕组磁链的分段解析式为

$$\Psi(i,\theta)=\begin{cases} L_{\min}i & (\theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\min}i+K(\theta-\theta_2)i & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\min}i+K(\theta-\theta_2)i_1 & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_2<\theta\leqslant\theta_3) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\max}i & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\min}i+i_1(L_{\max}-L_{\min}) & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_3<\theta\leqslant\theta_4) \\ \left.\begin{array}{ll} L_{\max}i-K(\theta-\theta_4)i & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ L_{\max}+L_{\min}i-L_{\min}-K(\theta-\theta_4) & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_4<\theta\leqslant\theta_5) \end{cases} \tag{3-76}$$

电磁转矩的瞬时值表达式可表示为

$$T_e=\begin{cases} 0 & (\theta_1\leqslant\theta\leqslant\theta_2) \\ \left.\begin{array}{ll} Ki^2/2 & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ Kii_1 & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_2<\theta\leqslant\theta_3) \\ 0 & (\theta_3<\theta\leqslant\theta_4) \\ \left.\begin{array}{ll} -Ki^2/2 & 0\leqslant i\leqslant i_1 \\ -Kii_1 & i\geqslant i_1 \end{array}\right\} & (\theta_4<\theta\leqslant\theta_5) \end{cases} \tag{3-77}$$

根据式(3-77)可以得出如下结论。

(1) 电磁转矩与电流的方向无关，与电流的大小有关。当电流较小时，磁路处于非饱和阶段，电磁转矩的大小与电流的平方成比例；当电流较大时，磁路处在饱和区，电磁转矩的大小与电流成比例关系。

(2) 表达式中的正负代表转矩的方向。在电感曲线的上升段，绕组中通电所产生的电磁转矩为正，推动转子旋转；在电感曲线的下降段，绕组中通电所产生的电磁转矩为负，对转子旋转有阻力作用；在电感曲线的恒值区，即当电感为最大值或最小值时，电磁转矩为零，在这个阶段电磁转矩对转子无作用力。

因此，选择不同时刻对电动机绕组通电，就能产生不同方向及大小的电磁转矩，从而使转子正向或反向、加速或减速运行。

3. 开关磁阻电动机非线性模型

非线性模型是将磁链用非线性函数进行拟合，拟合的精度取决于函数的选定，一般可对电感进行非线性拟合。它能够准确地描述电动机的磁链和转矩特性，精度较高，但因为磁链和转矩都是非线性方程，无法求出其解析解，因此计算相对复杂，特别是对于单片机控制而言。因此，它只适宜用于电动机性能计算和仿真。

利用傅里叶级数分解式(3-67)，且忽略高次谐波，电动机单相绕组电感随着转子位置的变化用一个恒定分量和一个基波分量来表示，即：

$$L_j(\theta)=L_0+L_1\cos(N_r\theta+\pi+\varphi_j) \tag{3-78}$$

式中，L_0为单相电感的恒定分量的幅值；L_1为单相电感的基波分量的幅值。

L_0和L_1可根据下式计算：

$$\begin{cases}L_0=(L_{max}+L_{min})/2\\L_1=(L_{max}-L_{min})/2\end{cases} \tag{3-79}$$

电感随电流变化是非线性的，可以用多项式级数近似表达，即

$$L_{max}=\sum_{n=0}^{N}a_n i^n \tag{3-80}$$

通过改变N值比较不同阶次多项式逼近$L_{max}(i)$的能力，从而确定N值用于原多项式级数以表达$L_{max}(i)$和相电流的非线性关系。

由式(3-78)和式(3-80)可以得到

$$\frac{\partial L_j(\theta)}{\partial\theta}=-L_1N_r\sin(N_r\theta+\pi+\varphi_j)=\left(\sum_{n=0}^{N}a_n i^n-L_{min}\right)N_r\sin(N_r\theta+\varphi_j) \tag{3-81}$$

$$\frac{\partial L_j(\theta)}{\partial i}=\sum_{n=0}^{N}a_n i^{n-1}/n[1/2+\cos(N_r\theta+\pi+\varphi_j)/2] \tag{3-82}$$

非线性电磁转矩可表示为

$$T_j=\int_0^i\frac{\partial L_j}{\partial\theta}i\,\mathrm{d}i=N_r\sin(N_r\theta+\varphi_j)\left[\sum_{n=0}^{N}a_n i^{n+2}/(n+2)-L_{min}i^i/2\right] \tag{3-83}$$

式中，$j=1$、2、3、4代表电动机的每一相，则有

$$\varphi_j=\begin{cases}0 & (j=1)\\\pi/2 & (j=2)\\\pi & (j=3)\\3\pi/2 & (j=4)\end{cases} \tag{3-84}$$

SR电动机非线性模型与线性模型相比，精度更高，并且也比较简单，适用于电动机控制分析和理论研究。

3.6.4 开关磁阻电动机的控制

开关磁阻电动机不同于常规的感应电动机，因其自身结构的特殊性，既可以通过控制电动机自身的参数(如开通角、关断角)来实现，也可以用适用于其他电动机上的控制理论，如PID控制、模糊控制等，对功率变换器部分进行控制，进而实现电动机的速度调节。

针对SRM自身参数进行控制，目前主要使用的几种基本控制方式有：角度位置控制(APC)、电流斩波控制(CCC)和电压控制(VC)。

1. 角度位置控制方式(APC)

角度位置控制是，当加在绕组上的电压一定的情况下，通过改变绕组上主开关的开通角θ_{on}和关断角θ_{off}，来改变绕组的通、断电时刻，调节相电流的波形，实现转速闭环控制。

根据电动势平衡方程式可知，当电动机转速较高时，旋转电动势较大，则此时电流上升率下降，各相的主开关器件的导通时间较短，电动机绕组的相电流不易上升，电流相对较小，便于使用角度位置控制方式。

因为开通角和关断角都可调节，角度位置控制可分为：变开通角、变关断角和同时改变开通角及关断角3种方式。改变开通角，可改变电流波形的宽度、峰值和有效值的大小，还可改变电流波形与电感波形的相对位置，从而改变了电动机的转矩和转速。而关断角一般不影响电流的峰值，但可改变电流波形的宽度及其与电感曲线的相对位置，进而改变电流的有效值。故一般采用固定关断角、改变开通角的控制方式。

根据SRM的转矩特性分析可知，当电流波形主要位于电感的上升区时，产生的平均电磁转矩为正，电动机运行在电动状态；当电流波形主要位于电感的下降段时，产生的平均电磁转矩为负，电动机工作在制动状态。而通过对开通角、关断角的控制，可以使电流的波形处在绕组电感波形的不同位置。因此，可以用控制开通角、关断角的方式来使电动机运行在不同的状态。

角度位置控制的优点在于：转矩调节的范围宽；可同时多相通电，以增加电动机的输出转矩，同时减小了转矩波动；通过角度的优化，能实现效率最优控制或转矩最优控制。

根据上面的分析可知，此法不适于低速场合。因为在低速时，旋转电动势较小，使电流峰值增大，必须采取相应措施进行限流，故一般用于转速较高的场合。

2. 电流斩波控制

根据电动势平衡方程式可知，电动机低速运行特别是启动时，旋转电动势引起的压降很小，相电流上升快，为避免过大的电流脉冲对功率开关器件及电动机造成损坏，需要对电流峰值进行限定，因此，可采用电流的斩波控制，获取恒转矩的机械特性。电流斩波控制一般不会对开通、关断角进行控制，它将直接选择在每相的特定导通位置对电流进行斩波控制。

目前常用的有两种方案：一是对电流上、下限进行限制的控制；二是限制电流上限值和恒定关断时间的控制。

方案一中，主开关器件在$\theta=\theta_{on}$时导通，绕组电流将从零开始上升，当电流增至斩波电流的上限值时，切断绕组电流，绕组承受反压，电流迅速下降；当电流降至斩波电流的下限值时，绕组再次导通，重复上述过程，从而形成斩波电流，直至达$\theta=\theta_{off}$时实现相关断。方案二同前者的区别在于，当绕组电流达最大限定值后，将主开关关断一个固定的时间后再开通，这样，电流下降的幅度主要取决于电感量、电感变化率、转速等因素。因此该方式的关键在于合理地选取关断时间的长度。

电流斩波控制的优点在于：它适用于电动机的低速调速系统，可以控制电流峰值的增长，并有很好的电流调节作用，因每相电流波形会呈现出较宽的平顶状，使得产生的转矩比较平稳，转矩的波动相应地比其他控制方式要小。

然而，由于电流的峰值受到了限制，当电动机转速在负载的扰动作用下发生变化时，电流的峰值无法做出相应的改变，使得系统的特性比较软，因此系统在负载扰动下的动态

响应很缓慢。

3. 电压控制

电压控制(VC)方式是保持开通角、关断角不变的前提下，使功率开关器件工作在脉冲宽度调制(PWM)方式。通过调节PWM波的占空比，来调整加在绕组两端电压的平均值，进而改变绕组电流的大小，实现对转速的调节。若增大调制脉冲的频率，就会使电流的波形比较平滑，电动机输出增大，噪声减小，但对功率开关器件的工作频率的要求就会更加严格。

按照续流方式的不同，该控制方式分为单管斩波和双管斩波方式。单管方式中，连接在每相绕组中的上、下桥臂的两个开关管只有一个处于斩波状态，另一个一直导通。而双管斩波方式中，两个开关管同时导通和关断，对电压进行斩波控制。考虑到系统效率等因素，实际应用中一般常用单管方式。

电压控制的优点在于，它通过调节绕组电压的平均值进而调节电流，因此可用在低速和高速系统，且控制简单，但它的调速范围有限。

在实际的SRD运用中，也可以采用多种控制方式相组合的方法。如高速角度控制和低速电流斩波控制组合，变角度电压斩波控制和定角度电压斩波组合控制等。这些组合方式各有优势及不足，因此必须针对不同的应用场合和不同的性能要求，合理地选择控制方式，才能使电动机运行于最佳状态。

根据系统性能要求的不同，控制电路的具体结构形式会有很大差异，但一般均应包含以下功能：

(1) 用于接收外部指令信号，如起动、转速、转向信号的操作电路；

(2) 用于给定量与控制量相比较，并按规定算法计算出控制参数的调节量的调节器电路；

(3) 用于决定控制电路的工作逻辑，如正反转相序逻辑、高低速控制方式的工作逻辑电路；

(4) 用于检测系统中的有关物理量，如转速、角位移、电流和电压的传感器电路；

(5) 用于当系统中某些物理量超过允许值时，采取相应保护措施的保护电路，如过电压保护和过电流保护；

(6) 用于控制各被控量信号的输出电路，如控制功率开关器件的导通与关断；

(7) 用于指示系统的工作状况和参数状态显示电路，如指示电动机转速、指示故障保护情况的显示。

4. 基于DSP的开关磁阻电动机控制

下面以四相SR电动机为例说明DSP控制器在开关磁阻电动机控制系统中的应用。

DSP控制器的出现为全数字控制提供了可靠的保证，而开关磁阻电动机系统的位置闭环控制、各相轮流导通的特殊运行方式特别适合采用直接数字控制。一方面，采用直接数字控制可以简化硬件电路，提高系统的可靠性。另一方面，SR电动机很难建立准确的数字模型，采用直接数字控制便于控制模式的切换和引入现代控制理论与方法，完善信息显示、故障诊断、保护等功能，实现通用化、标准化和智能化。

TMS320LF2407 DSP是TMS320x24x系列DSP控制器中面向高性能、高精度应用的产品，基于TMS320LF2407 DSP的开关磁阻电动机控制系统硬件如图3.58所示。在本系统中，

DSP负责判断转子位置信息，实时计算转速，并综合各种保护信号和给定信息以及转速情况给出通断信号，实现数字PI调节并产生定频调宽的PWM信号作为功率的驱动信号。

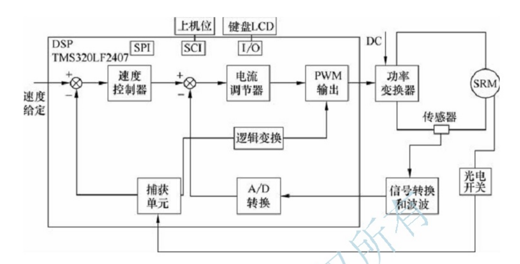


图3.58　基于TMS320LF2407 DSP的SRD控制系统硬件

下面简要介绍各功能电路及其与DSP的接口。

1）转子位置检测电路

如图3.59所示，四相SR电动机的两路位置信号分别输入到DSP控制器的两个捕获单元CAP1和CAP2。当捕获输入引脚检测到一个转换时，定时器T1或T2的值被捕获并存储在相应的两级FIFO堆栈中，位置信号的上下跳变均引起捕获单元的中断，即每隔15°产生一次捕获中断，CAP的中断服务程序根据转子的瞬间位置信息确定相应的导通和关断相，并计算电动机的转速。

2）PWM输出电路

DSP控制其产生PWM波形的方法有几种，此处介绍通过事件管理器模块的全比较单元和相应电路产生PWM信号(PWM1－PWM4)。全比较单元的时基由通用定时器1提供，当通用定时器1的计数值与全比较单元的比较寄存器的值匹配时，相关的输入引脚就发生电平跳变。因此，随时改变比较寄存器中的值就可以调节PWM输入的占空比。这种软件控制PWM波的灵活性尤其适用于SR电动机的控制。

如图3.60所示，利用DSP的比较单元和PWM脉冲发生电路输出PWM信号，PWM信号经施密特触发器整形后，输入到EXB841的输入端，控制相应相IGBT的通断。

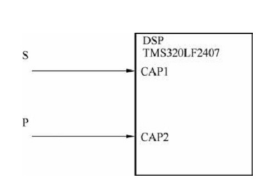


图3.59　位置检测电路接口

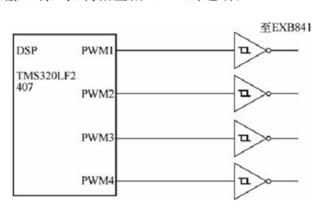


图3.60　PWM输出电路



3）电流检测

TMS320LF2407 内有两个 10 位 8 通道 A/D 转换器，每次 A/D 转换的最长时间为 6.6μs，两个转换器可以并行工作，转换结果存在一个两级 FIFO 寄存器中。模拟输入引脚 ADCIN0～ADCIN7 属于模拟转换单元 1，ADCIN8～ADCIN16 属于模拟转换单元 2。其中，ADCIN0、ADCIN1 以及 ADCIN8、ADCIN9 与数字 I/O 模块复用，如果对这些引脚输入的模拟量进行转换，其转换精度低于专用引脚。

电流检测采用两个磁场平衡式霍尔电流传感器，电流传感器的输出经加法器全变换至合适的范围后，输入到 DSP 的 ADCIN2、ADCIN3 引脚，电流检测电路的接口如图 3.61 所示。

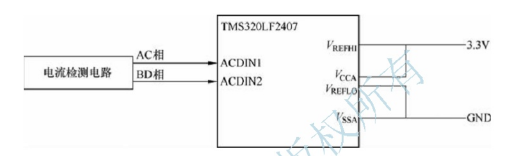


图 3.61 电流检测电路与 DSP 的接口

下列方程给出了转换公式：

$$数字结果=1023\times\frac{模拟输入电压-V_{REFLO}}{V_{REFHI}-V_{REFLO}} \tag{3-85}$$

式中，V_{REFLO}为 ADC 模拟输入参考电压低电平；V_{REFHI}为 ADC 模拟输入参考电压高电平。

TMS320LF2407 DSP 的供电电源为 3.3V，因此模拟输入的参考电压高电位为 3.3V，低电位为 0V。所以，电流传感器的输出电压应转换到 0～3.3V。

电流检测的采样时间为 50μs，与 PWM 波频率相同，即在每个 PWM 波周期内完成一次电流 A/D 转换。

4）故障检测与保护电路

为保证系统中功率变换电路及电机驱动电路安全可靠地工作，DSP 控制器提供了引脚 PDPINT(功率驱动保护中断)。当器件引脚 PDPINT 被置为低电平时，将产生一个外部中断。利用它可以方便地实现系统的各种保护功能，具体实现电路如图 3.62 所示。

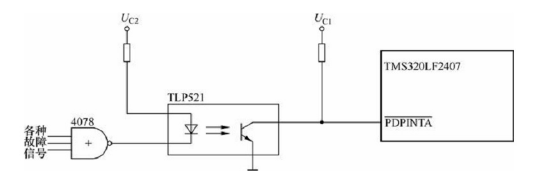


图 3.62 系统保护电路

各种故障信号由或非门 CD4078 综合后，经光电隔离输入到 PDPINT 引脚。任何故障状态的出现都将使 4078 输出低电平，PDPINT 引脚也被拉为低电平，此时 DSP 内定时器

立即计数，所有 PWM 输出引脚全部呈高阻态，同时产生中断信号，通知 CPU 有异常情况发生。整个过程不需要程序干预，全部自动完成，这对各种故障状态的快速处理非常有利。

5）键盘与显示器接口

从操作的实用性出发，设置 8 个功能键，分别为启动键、停止键、增值键、减值键、正反转控制键、设置键、确认键和复位键。除复位键外，其余各键均直接连到 DSP 的 I/O 口线上，复位键连接到 DSP 复位引脚。

采用内置驱动电路的液晶显示器 1602A。1602A 通过 DSP 的通用 I/O 口驱动。

6）DSP 最小系统

TMS320LF2407 接晶振、复位电路，并外扩 64K 字程序存储器和 64K 字数据存储器构成 DSP 最小应用系统，具体电路可以参阅有关书籍。

下面简要介绍控制策略的实现。

以 TMS320LF2407 为核心的 SRD 双闭环调速系统控制策略如图 3.63 所示。系统有两个反馈环，即速度外环和电流内环。速度反馈信号取自位置传感器输出的转子位置信号，与给定速度比较后作为速度环 PI 调节器的输入。而转速调节器的输出值作为电流指令值再与电流传感器测出的实际电流相比较，形成电流偏差，以控制 PWM 信号的脉宽。

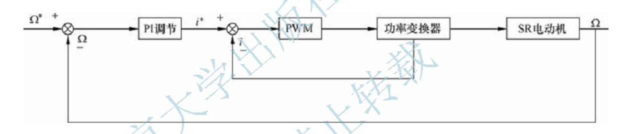


图 3.63　SRD 控制策略框图

采用电流斩波控制与角度控制相结合的控制方法，启动时采用两相全开通电流斩波控制；在基速以下，采用变角度斩波方式；基速以上，采用 APC 控制。

转速采样周期为 5ms，电流采样周期为 50μs。转速 PI 调节和电流斩波控制均由软件实现。

为简明起见，采用 PID 算法进行速度闭环调节。由于 SR 电动机具有较好的动态特性，实际上只使用了比例和积分环节即 PI 调节。实施 PI 调节的关键在于比例系数和积分时间常数的整定，它直接影响到系统的动静特性和控制品质。由于 SR 电动机很难建立准确的数学模型，两个参数实际上要经过反复调试得到。

电流斩波控制采用软件方法实现，在 PWM 脉宽控制中断子程序(通用定时器 1 中断)中启动 ADC 单元的 ADCIN2 和 ADCIN3，对电流传感器进行电流采样，读出电流采样值。当此实际电流值大于给定电流值时，就封锁 PWM1～PWM4 输出，关断 IGBT，使相电流下降；当下一个中断到来时，再一次重复上述过程。如果实际电流值小于给定流值时，则重新开放 PWM 输出，从而使相电流得到控制。采用这种软件实现的电流斩波方式可以灵活地改变过流及启动斩波的电流设定值，节省了外围电路的成本。

两路转子位置信号分别输入到捕获单元 CAP1 和 CAP2，定义跳变检测方式为上升下降沿，则转子每转过 15°，就发生一次捕获中断。因为在捕获单元使能后，输入引脚上的

指定跳变将所选通用定时器的计算转入到相应的FIFO栈，所以FIFO记录的数值就反映了转子转过这一角度所用的时间。通过捕获单元测出电动机每转过15°对应的时钟脉冲数，即可得到每个脉冲对应的角度。

根据上述的控制策略，编制的控制软件流程如图3.64所示。



图3.64 基于TMS320LF2407 DSP的SRD系统控制流程

软件主要由以下程序模块组成。

(1) 主程序。通过调用各子程序，执行相应的控制指令，在后台完成调速功能。

(2) 初始化子程序。DSP控制器内部集成了许多外围器件，如A/D转换、事件管理器模块等，在系统工作之前，需要对硬件初始化，同时还要对有关控制标志、初始参数、开关量、工作单元、工作模式及中断系统进行初始化，以保证各功能单元按设计要求工作。

(3) 定时器中断。完成电流PWM控制、转速PI控制、换相控制以及角度和位置的估计功能。

(4) 捕获中断。对捕获单元检测的位置信号进行判断并处理。



1. 电动汽车用电动机主要有哪几种？其特点是什么？
2. 电动汽车对电动机有哪些要求？
3. 直流电动机有哪些类型？其运行特性如何？
4. 直流电动机的转速控制方法有哪些？
5. 无刷直流电动机工作原理如何？其控制方法有哪些？
6. 异步电动机工作原理如何？其控制方法有哪些？
7. 永磁同步电动机的运行原理与特性如何？
8. 开关磁阻电动机工作原理如何？其控制方法有哪些？

第 4 章　纯电动汽车

纯电动汽车是指以车载电源为动力，用电动机驱动车轮行驶，符合道路交通、安全法规各项要求的车辆。一般采用高效率充电蓄电池为动力源。纯电动汽车无需再用内燃机，因此，纯电动汽车的电动机相当于传统汽车的发动机，蓄电池相当于原来的油箱，电能是二次能源，可以来源于风能、水能、热能、太阳能等多种方式。

4.1　概　　述

4.1.1　纯电动汽车的分类

1. 按用途分类

按用途不同，纯电动汽车可以分为以下几类：

(1) 纯电动轿车；

(2) 电动货车；

(3) 电动客车等。

2. 按驱动形式分类

按动力驱动控制系统结构形式不同，纯电动汽车可以分为以下几类：

(1) 直流电动机驱动的电动汽车；

(2) 交流电动机驱动的电动汽车；

(3) 双电动机驱动的电动汽车；

(4) 双绕组电动机驱动的电动汽车；

(5) 轮毂电动机驱动的电动汽车。

3. 按使用的电池类型分类

按使用的电池类型不同，纯电动汽车可以分为以下几类：

(1) 铅酸蓄电池电动汽车；

(2) 镍氢电池电动汽车；

(3) 锂离子电池电动汽车；

(4) 燃料电池电动汽车。

此外，目前研究应用的还有使用镍镉电池、钠硫电池、飞轮电池、太阳能电池和超级电容等的电动汽车。

4.1.2　纯电动汽车的组成与原理

电动汽车主要由电力驱动系统、电源系统和辅助系统 3 部分组成。

典型电动汽车组成框图如图 4.1 所示。

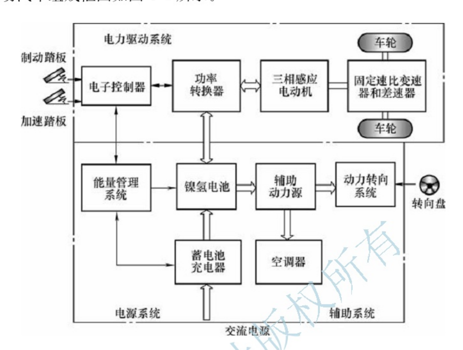


图 4.1 典型电动汽车组成框图

当汽车行驶时，由蓄电池输出电能(电流)通过控制器驱动电动机运转，电动机输出的转矩经传动系统带动车轮前进或后退。电动汽车续驶里程与蓄电池容量有关，蓄电池容量受诸多因素限制。要提高一次充电续驶里程，必须尽可能地节省蓄电池的能量。

1. 电力驱动系统

电力驱动系统主要包括电子控制器、功率转换器、电动机、机械传动装置和车轮等。它的功用是将存储在蓄电池中的电能高效地转化为车轮的动能，并能够在汽车减速制动时，将车轮的动能转化为电能充入蓄电池。

电动汽车应用较多的电动机有直流电动机和交流电动机两大类。电动汽车的驱动系统采用直流电动机时，虽然在结构上有许多独到之处，如不需要离合器、变速器，并具有起步加速牵引力大，控制系统较简单等优点，但它的整个动力传动系统效率低，所以逐渐被其他驱动类型电动机替代。电动汽车使用的交流电动机驱动系统，突出的优点是体积小、质量轻、效率高、调速范围宽和基本免维护等优点。但其制造成本较高。随着电力电子技术的进一步发展，成本将随之降低，采用这类驱动系统的电动汽车将具有强大的生命力。

电动汽车的控制系统的性能直接影响着汽车的性能指标。该控制系统控制汽车在各类工况下的行驶速度、加速度和能源转换情况。它类似于燃油汽车的加速踏板和变速器，包括电动机驱动器、控制器及各种传感器，其中最关键的是电动机逆变器。

电动机不同，控制器也有所不同。控制器将蓄电池直流电逆变成交流电后驱动交流驱动电动机，电动机输出的转矩经传动系统驱动车轮，使电动汽车行驶。

有关电动机的相关内容请参见第 3 章中的介绍。

2. 电源系统

电源系统主要包括电源、能量管理系统和充电机等。它的功用是向电动机提供驱动电

能、监测电源使用情况以及控制充电机向蓄电池充电。

纯电动汽车的常用电源有铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂离子电池等。

纯电动汽车和混合动力汽车的能量管理不同，纯电动汽车主要是指电池管理系统，它的主要功用是对电动汽车用电池单体及整组进行实时监控、充放电、巡检、温度监测等。

有关电池的相关内容请参见第2章中的介绍。

3. 辅助系统

辅助系统主要包括辅助动力源、空调器、动力转向系统、导航系统、刮水器、收音机以及照明和除霜装置等。辅助系统除辅助动力源外，其余的依据车型不同而不同。

辅助动力源主要由辅助电源和DC/DC功率转换器组成。它的功用是向动力转向系统、空调器及其他辅助设备提供动力。

4.1.3 纯电动汽车驱动系统布置形式

电动汽车的驱动系统是电动汽车的核心部分，其性能决定着电动汽车运行性能的好坏。电动汽车的驱动系统布置取决于电动机驱动系统的方式，可以有多种多样。常见的驱动系统布置形式如图4.2所示。

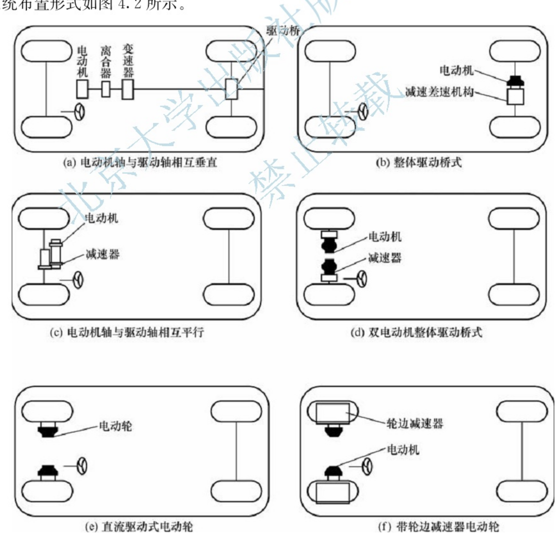


图4.2 纯电动汽车驱动系统布置方案

(1) 第1种与传统汽车驱动系统的布置方式一致，带有变速器和离合器。只是将发动机换成电动机，属于改造型电动汽车。这种布置可以提高电动汽车的起动转矩，增加低速时电动汽车的后备功率。

(2) 第2种取消了离合器和变速器。优点是可以继续沿用当前发动机汽车中的动力传动装置，只需要一组电动机和逆变器。这种方式对电动机的要求较高，不仅要求电动机具有较高的起动转矩，而且要求具有较大的后备功率，以保证电动汽车的起动、爬坡、加速超车等动力性。

(3) 第3种布置方式是将电动机装到驱动轴上，直接由电动机实现变速和差速转换。这种传动方式同样对电动机有较高的要求，大的起动转矩和后备功率，同时不仅要求控制系统有较高的控制精度，而且要具备良好的可靠性，从而保证电动汽车行驶的安全、平稳。

(4) 第4种布置方式同第3种布置方式比较接近，将电动机直接装到了驱动轮上，由电动机直接驱动车轮行驶。

目前，我国的电动汽车大多建立在改装车的基础上，其设计是一项机电一体化的综合工程。改装后高性能的获得并不是简单地将内燃机汽车的发动机和油箱换成电动机和蓄电池便可以实现的，它必须对蓄电池、电动机、变速器、减速器和控制系统等参数进行合理的匹配，而且在进行总体方案布置时必须保证连接可靠、轴荷分配合理等。

4.1.4 纯电动汽车的特点

1. 无污染，噪声低

电动汽车无内燃机汽车工作时产生的废气，不产生排气污染，对环境保护和空气的洁净是十分有益的，有“零污染”的美称；电动汽车无内燃机产生的噪声，电动机的噪声也较内燃机小。但是，使用电动汽车并非绝对无污染，例如使用铅酸蓄电池做动力源，制造、使用中要接触到铅，充电时产生酸气，会造成一定的污染；蓄电池充电所用的电力，在用煤炭做燃料时会产生CO、SO_2、粉尘等；随着技术的发展，可以用其他电池做电动汽车的电源，如发展水电、核电、太阳能充电等。

2. 能源效率高，多样化

电动汽车的研究表明，其能源效率已超过汽油机汽车，特别是在城市运行，汽车走走停停，行驶速度不高，电动汽车更加适宜。电动汽车停车时不消耗电量，在制动过程中，电动机可自动转化为发电机，实现制动减速时能量的再利用。

另一方面，电动汽车的应用可有效地减少对石油资源的依赖，可将有限的石油用于更重要的方面。向蓄电池充电的电力可以由煤炭、天然气、水力、核能、太阳能、风力、潮汐等能源转化而来。除此之外，如果夜间向蓄电池充电，还可以避开用电高峰，有利于电网均衡负荷，减少费用。

3. 结构简单，使用维修方便

电动汽车较内燃机汽车结构简单，运转、传动部件少，维修保养工作量小；当采用交流感应电动机时，电动机无需保养维护；更重要的是电动汽车易操纵。

4. 动力电源使用成本高，续驶里程短

目前电动汽车尚不如内燃机汽车那样技术完善，尤其是动力电源(电池)的寿命短，使用成本高。电池的储能量小，一次充电后行驶里程不理想。电动车的价格较贵。但从发展的角度看，随着科技的进步，投入相应的人力物力，电动汽车的问题会逐步得到解决。扬长避短，电动汽车会逐渐普及，其价格和使用成本必然会降低。

4.1.5 纯电动汽车的关键技术

1. 电动机及控制技术

电动汽车的驱动电动机属于特种电动机，是电动汽车的关键部件。要使电动汽车有良好的使用性能，驱动电动机应具有较宽的调速范围及较高的转速，足够大的起动转矩，体积小、质量轻、效率高且有动态制动强和能量回馈的性能。电动汽车所用的电动机正在向大功率、高转速、高效率和小型化方向发展。

随着电动机及驱动系统技术的发展，控制系统趋于智能化和数字化。变结构控制、模糊控制、神经网络控制、自适应控制，以及专家系统、遗传算法等非线性智能控制技术，都将应用于电动汽车的电动机控制系统。它们的应用将使系统结构简单、响应迅速、抗干扰能力强，参数变化具有鲁棒性，可大大提高整个系统的综合性能。

电动汽车再生制动控制系统可以节约能源、提高续驶里程，具有显著的经济价值和社会效益。再生制动还可以减少汽车制动片的磨损，降低车辆故障率及使用成本。

2. 电池及管理技术

电池是电动汽车的动力源泉，也是一直制约电动汽车发展的关键因素。电动汽车用电池要求比能量高、比功率大、使用寿命长，但目前的电池能量密度低，电池组过重，续驶里程短，价格高，循环寿命有限。

电动汽车车用动力蓄电池经过3代的发展，已取得了突破性的进展。第1代是铅酸电池，由于其比能量较高、价格低和能高倍率放电，因此是目前唯一能大批量生产的电动汽车用电池。第2代是碱性电池，主要有镍镉、镍氢、钠硫、锂离子和锌空气等多种电池，其比能量和比功率都比铅酸电池高，因此大大提高了电动汽车的动力性能和续驶里程，但其价格却比铅酸电池高。只要能采用廉价材料，电动汽车用锂离子电池将获得长足的发展，目前关键是要降低批量化生产的成本，提高电池的可靠性、一致性及寿命。第3代是以燃料电池为主的电池。燃料电池能量转变效率、比能量和比功率都高，并且可以控制反应过程，能量转化过程可以连续进行，因此是理想的汽车用电池。

电池组性能直接影响整车的加速性能、续驶里程以及制动能量回收的效率等。电池的成本和循环寿命直接影响车辆的成本和可靠性，所有影响电池性能的参数必须得到优化。电动车的电池在使用中发热量很大，电池温度影响电池的电化学系统的运行、循环寿命和充电可接受性、功率和能量、安全性和可靠性。所以，为了达到最佳的性能和寿命，需将电池包的温度控制在一定范围内。减小包内不均匀的温度分布以避免模块间的不平衡，以此避免电池性能下降，且可以消除相关的潜在危险。由于电池包的设计既要密封、防水、防尘、绝缘等，又要考虑空气流流场分布、均匀散热，所以电池包的散热通风设计，成为电动车研究的一个重要领域。

3. 整车控制技术

新型纯电动轿车整车控制系统是两条总线的网络结构，即驱动系统的高速 CAN 总线和车身系统的低速总线。高速 CAN 总线每个节点为各子系统的 ECU。低速总线按物理位置设置节点，基本原则是基于空间位置的区域自治。

实现整车网络化控制，其意义不只是解决汽车电子化中出现的线路复杂和线束增加问题，网络化实现的通信和资源共享能力成为新的电子与计算机技术在汽车上应用的一个基础，同时也为 X－by－Wire 技术提供了有力的支撑。

4. 整车轻量化技术

整车轻量化始终是汽车技术重要的研究内容。纯电动汽车由于布置了电池组，整车质量增加较多，轻量化问题更加突出。但可以采用以下措施减轻整车质量。

(1) 通过对整车实际使用工况和使用要求的分析，对电池的电压、容量、驱动电动机功率、转速和转矩、整车性能等车辆参数的整体优化，合理选择电池和电动机参数。

(2) 通过结构优化和集成化、模块化优化设计，减轻动力总成、车载能源系统的质量。这里包括对电动机及驱动器、传动系统、冷却系统、空调和制动真空系统的集成和模块化设计，使系统得到优化；电池、电池箱、电池管理系统、车载充电机组成的车载能源系统的合理集成和分散，实现系统优化。

(3) 积极采用轻质材料，如电池箱的结构框架、箱体封皮、轮毂等采用轻质合金材料。

(4) 利用 CAD 技术对车身承载结构件(如前后桥，新增的边梁、横梁)进行有限元分析研究，用计算和试验相结合的方式，实现结构最优化。

4.1.6 纯电动汽车主要技术指标

在“十二五”期间，我国要开展电动汽车大规模商业化示范运行，为实现电动汽车规模产业化，尤其是为纯电驱动汽车销量达到同类车型总销量1%左右的目标提供科技支撑。

我国大规模商业化示范的纯电动汽车主要技术指标见表4－1。

表4－1 大规模商业化示范的纯电动汽车主要技术指标

指标		小型纯电动轿车	公共服务领域纯电动商用车
动力电池	能量密度/(W·h/kg)	模块≥120	
	循环寿命	≥2000次(100%DOD)	
	日历寿命	≥10年	
	目标成本/[元/(W·h)]	模块≤1.5	
车用电动机	成本/[元/(W·h)]	≤200	≤300
	功率密度/(kW/kg)	≥2.7	≥1.8
	最高效率/(%)	≥94	
电子控制		纯电动汽车电动化总成控制系统 先进的纯电动汽车分布式控制系统 纯电动汽车车载信息、智能充电和远程监控系统	

（续表）

指标		小型纯电动轿车	公共服务领域纯电动商用车
整车平台	最高车速/(km/h)	≥75(微型)	≥80～110
		≥100	
	续驶里程/km	≥100	≥150(非快充类)
	附加成本	与同级别燃油车辆或基础车型相当(不包括储能系统)	
支撑平台	基础设施	交流充电桩40万个以上，集中充/换电站2000座	
	示范城市	≥25个	

下一代纯电驱动技术突破的主要技术指标见表4-2。

表4-2　下一代纯电驱动技术突破的主要技术指标

指标			轿车	客车
动力电池	能量型/(W·h/kg)	新型	≥250	
	电池单体能量密度/(W·h/kg)	新体系	≥400	
	功率型电池单体能量密度/(W/kg)	≥5000		
车用电机	功率密度/(kW/kg)	3.0		
	最高效率/(%)	94		
电子控制		新型电机集成驱动的底盘动力学控制技术； 下一代纯电驱动整车控制系统关键技术；纯电驱动汽车ITS及车网融合(V2G，V2H)技术		
整车平台	最高车速/(km/h)	≥180		≥80
	纯电续驶里程/km	≥250		≥200
	经济性	≤140W·h/km		≤0.05kW·h/(km·t)

4.2　纯电动汽车传动系统参数设计

电动汽车动力传动系统的设计应该满足车辆对动力性能和续驶里程的要求。车辆行驶的动力性能可以用以下4个指标来评价：

(1) 起步加速性能。电动汽车由静止起步并以最大的加速度加速到某一车速或在某一预定的距离加速行驶所需的最短时间。

(2) 最高车速稳定行驶的能力。在水平良好的路面上，电动机发出的功率应该能够维持电动汽车以最高车速行驶的能力。

(3) 额定车速稳定行驶的能力。对电动汽车来说，蓄电池和电动机提供的全部功率能满足电动汽车以额定车速稳定行驶的能力。



（4）最大爬坡能力。电动汽车提供的功率能使其爬上最大坡度路面的能力。

除此之外，电动汽车上动力电池组的能量应该能够维持行驶一定的续驶里程。

4.2.1 电动机参数设计

电动机参数设计主要包括设计电动机的额定功率、峰值功率、额定转速、最高转速、最大转矩及额定电压等参数。

1. 电动机的额定功率和峰值功率

电动机是电动汽车行驶的动力源，对整车的动力性有直接影响。所选的电动机功率越大，整车的动力性也就越好，但是如果功率过大，电动机的质量和体积也会增大，且电动机的工作效率不高，这样就不能充分利用有限的车载能源，从而使续驶里程降低。因此，电动机功率参数设计时通常参考汽车的最高车速、最大爬坡度和加速性能。

1）根据电动汽车最高车速确定电动机功率

设计中初步选择电动机的额定功率应不小于汽车以最高车速行驶时行驶阻力消耗的功率之和，电动汽车以最高车速行驶消耗的功率为

$$P_{m1}=\frac{u_{max}}{3600\eta_t}\left(mgf+\frac{C_DAu_{max}^2}{21.15}\right) \tag{4-1}$$

式中，m 为整车质量(kg)；f 为滚动阻力系数；C_D 为迎风阻力系数；A 为迎风面积(m^2)；u_{max} 为最高行驶车速(km/h)；η_t 为机械传动系统效率。

2）根据电动汽车最大爬坡度确定电动机功率

电动汽车以某一车速爬上最大坡度消耗的功率为

$$P_{m2}=\frac{u_p}{3600\eta_t}\left(mgf\cos\alpha_{max}+mg\sin\alpha_{max}+\frac{C_DAu_p^2}{21.15}\right) \tag{4-2}$$

式中，u_p 为电动汽车爬坡时的行驶速度(km/h)；α_{max} 为最大坡度角。

3）根据电动汽车加速性能确定电动机功率

电动汽车在水平路面上加速行驶消耗的功率为

$$P_{m3}=\frac{u_f}{3600\eta_t}\left(mgf+\frac{C_DA}{21.15}u_f^2+\delta m\frac{du}{dt}\right) \tag{4-3}$$

式中，δ 为汽车旋转质量换算系数；u_f 为电动汽车加速后达到的速度(km/h)；$\frac{du}{dt}$ 为加速度。

电动机额定功率应满足电动汽车对最高车速的要求，峰值功率应能同时满足电动汽车对最高车速、最大爬坡度和加速度的要求。所以电动汽车电动机的额定功率和峰值功率分别为

$$P_e\geqslant P_{m1} \tag{4-4}$$

$$P_{e\,max}\geqslant \max\{P_{m1}\quad P_{m2}\quad P_{m3}\} \tag{4-5}$$

电动汽车电动机的峰值功率与额定功率的关系为

$$P_{e\,max}=\lambda P_e \tag{4-6}$$

式中，$P_{e\,max}$ 为电动机的峰值功率；P_e 为电动机的额定功率；λ 为电动机的过载系数。

2. 电动机的最高转速和额定转速

电动汽车最高行驶速度与电动机最高转速之间的关系为

$$n_{\max}=\frac{u_{\max}\sum i}{0.377r} \tag{4-7}$$

式中，$n_{\max}$ 为电动机的最高转速(r/min)；$u_{\max}$ 为电动汽车的最高行驶车速(km/h)；$\sum i$ 为传动系统传动比，一般包括变速器传动比和主减速器传动比；r 为车轮半径(m)。

电动机额定转速为

$$n_{e}=\frac{n_{\max}}{\beta} \tag{4-8}$$

式中，β 为电动机扩大恒功率区系数。β 值越大，转速越低，转矩增高，有利于提高车辆的加速和爬坡性能，稳定运行性能越好，但同时功率变换器尺寸也会增大，因此 β 值不宜过高。β 通常取值为 2～4。

3. 电动机最大转矩

电动机最大转矩的选择需要满足汽车起动转矩和最大爬坡角的要求，同时结合传动系统最大传动比来确定。

$$T_{\max}\geqslant\frac{mg\left(f\cos\alpha_{\max}+\sin\alpha_{\max}\right)r}{\eta_{t}i_{\max}} \tag{4-9}$$

式中，$i_{\max}$ 为传动系统最大传动比。

4. 电动机额定电压

电动机额定电压与电动机的额定功率成正比，额定功率越大额定电压也就越大。电动机额定电压选择与电动汽车电池组的电压有密切的关系。因此，要选择合适的电池组的电压和电流以满足整车能源的需要。不过最终都是由所选取的电动机的参数来决定额定电压。

4.2.2 传动系统传动比设计

在电动机输出特性一定时，传动系统的传动比如何选择，依赖于整车的动力性指标要求，即电动汽车传动比的选择应该满足汽车最高期望车速、最大爬坡度以及对加速时间的要求。

1. 传动系统传动比的上限

传动系统传动比的上限由电动机最高转速和最高行驶车速确定。

$$\sum_{\min} i\leqslant\frac{0.377n_{\max}r}{u_{\max}} \tag{4-10}$$

2. 传动系统传动比的下限

传动系统传动比的下限由下述两种方法算出的传动系统速比的最大值确定。

由电动机最高转速对应的输出转矩和最高行驶车速对应的行驶阻力确定传动系统传动比下限为

$$\sum_{\max} i\geqslant\frac{r}{\eta_{t}T_{u\max}}\left(mgf+\frac{C_{D}Au_{\max}^{2}}{21.15}\right) \tag{4-11}$$

式中，$T_{u\max}$ 为电动机最高转速对应的输出转矩。

由电动机的最大输出转矩和最大爬坡度对应的行驶阻力确定传动系统传动比下限为

$$\sum_{\max} i \geqslant \frac{r}{\eta_t T_{\max}}\left(mgf\cos\alpha_{\max} + mg\sin\alpha_{\max} + \frac{C_D A u_f^2}{21.15}\right) \quad (4-12)$$

式中，$T_{\max}$ 为电动机最大输出转矩(N·m)。

4.2.3 电池组参数设计

动力电池是整车的能量来源，整车所有的能量消耗都来自电池组。因此所选择的电池组的类型、质量和各种技术参数都会影响电动汽车的整车性能，是电动汽车的关键部件之一。电动汽车动力电池系统的参数匹配主要包括电池的类型、电池组的数目、电池组容量、电池组电压等参数的选择。

1. 动力电池匹配原则

动力电池类型的选择要符合电动汽车的运行要求。电动汽车要求动力电池具有较高的比能量和比功率，以满足汽车的续驶里程和动力性的要求，同时也希望动力电池具有与汽车使用寿命相当的充放电循环寿命，拥有高效率、良好的性价比以及免维护特性。

动力电池的电压等级要与电动机电压等级相一致且满足电动机电压变化的要求。同时，由于电动空调、电动真空泵和电动转向助力泵等附件也消耗一定的电能，所以电池组的总电压要大于电动机的额定电压。

动力电池一般有能量型与功率型两种，为满足电动汽车的行驶要求，采用能量型电池，匹配时主要考查电池的能量，即电池应具有较大的容量，以增加车辆的续驶里程。电池容量与其功率成正比，容量越大，其输出的功率越大，所以其输出功率均能满足整车电力系统的要求，因此主要是根据其续驶里程来确定电池容量，并且确定的电池容量还须符合市场现有产品的标准，并通过对现有产品反复验证进行设计。

2. 动力电池组参数匹配

1）动力电池组类型选择

目前可用于电动汽车的动力电池主要有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池和燃料电池。其中锂离子电池的高能量和充放电速度快等优越性能得到越来越多的关注，是目前市场前景最好的一种产品。

2）电池组数目的确定

电池组数目必须满足电动汽车行驶时所需的最大功率和续驶里程的要求。

满足电动汽车行驶时所需的最大功率要求的电池组数目为

$$n_p = \frac{P_{e\max}}{P_{b\max}\eta_e\eta_{ec}N} \quad (4-13)$$

式中，$P_{e\max}$ 为电动机的峰值功率(kW)；η_e 为电动机的工作效率；η_{ec} 为电动机控制器的工作效率；$P_{b\max}$ 为电池最大输出功率(kW)；N 为单电池组所包含的电池的数目。

满足电动汽车续驶里程要求的电池组数目为

$$n_x = \frac{1000SW}{C_s V_s N} \quad (4-14)$$

式中，S 为续驶里程(km)；W 为电动汽车行驶 1km 所消耗的能量(kW)；C_s 为单节电池的容量(A·h)；V_s 为单节电池的电压(V)。

电池组数目为

$$n = \max\{n_p \quad n_x\} \tag{4-15}$$

3)电池组容量

电池组能量为

$$E_B = \frac{U_m C_E}{1000} \tag{4-16}$$

式中,E_B 为电池组能量(kW·h);U_m 为电池组电压(V);C_E 为电池组容量(A·h)。

蓄电池能量应满足以下条件:

$$E_B \geqslant \frac{mgf + C_D A u_a^2/21.15}{3600 \times DOD \eta_t \eta_{mc} \eta_{dis}(1-\eta_a)} \times S \tag{4-17}$$

式中,η_{mc} 为电动机效率;η_{dis} 为蓄电池放电效率;η_a 为汽车附件能量消耗比例系数;DOD 为蓄电池放电深度。

或者蓄电池容量满足以下条件:

$$C_E \geqslant \frac{mgf + C_D A u_a^2/21.15}{3.6 \times DOD \eta_t \eta_{mc} \eta_{dis}(1-\eta_a) U_m} \times S \tag{4-18}$$

4.2.4 设计实例

已知电动汽车整车质量为1350kg,滚动阻力系数为0.0144,迎风面积为$1.9m^2$,迎风阻力系数为0.3,轮胎滚动半径为0.28m,最高车速为100km/h,最大爬坡度为20%,续驶里程为150km。根据式(4-1)~式(4-18)就可以对电动汽车动力传动系统参数进行匹配。计算结果如下:

1. 电动机参数

电动机类型选取交流感应电动机,额定功率 P_e =30kW;峰值功率 $P_{e\,max}$ =72kW;过载系数 λ =2.4;最高转速 n_{max} =9000r/min。

2. 传动系统传动比

主减速器传动比为4.3245。

采用Ⅲ挡变速器,Ⅰ挡传动比为2.0898,Ⅱ挡传动比为1.4456,Ⅲ挡传动比为1。

3. 蓄电池参数

电池类型选择镍氢电池,其容量为250A·h,比能量为80W·h/kg,比功率为230W/kg,电池组数目为22。

电动汽车传动系统主要参数都是从汽车行驶时所消耗的能量出发推导计算得到的,理论上,它的动力性和续驶里程能够满足设计要求。

4.2.5 性能仿真

电动汽车的设计是否满足要求,需要对电动汽车的性能进行仿真分析。

基于ADVISOR建立电动汽车主要部件及整车仿真模型,其组成示意图如图4.3所示。

1. 电动机仿真模型

电动汽车用的交流电动机/控制器仿真模型总成如图4.4所示,包括转动惯量影响子模块、转速评价器、转矩限制子模块以及温度控制子模块等。电动机/控制器仿真模型能

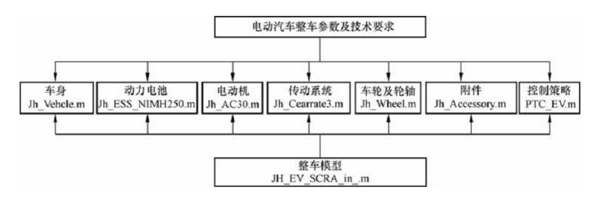


图 4.3　整车模型组成示意图

够把需求的转速、转矩转化为电能需求并把电能转化成转矩和转速输出。

此模块可以计算牵引电动机的转矩、转速、输入功率以及对电动机的转矩、转速进行限制，并控制牵引电动机的温度；输入控制电动机的特性，并对转动惯量以及电动机温度的影响进行计算，最后得到电动机输出的有效驱动转矩和转速，以及电动机输入的能量。

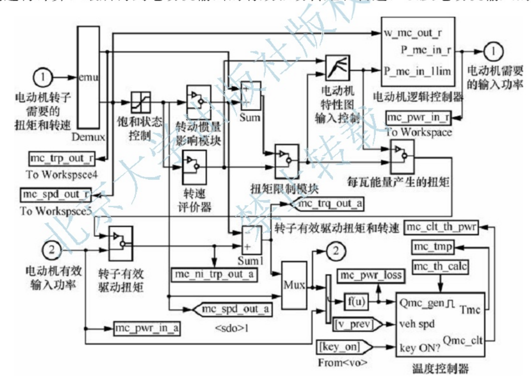


图 4.4　电动机/控制器仿真模型总成

2. 蓄电池仿真模型

蓄电池在充放电时伴随着复杂的化学反应，产生的热量导致电池温度也会发生变化。因此蓄电池的电化学特性是一个与各种随机变量相关的非线性函数。实际上，电化学电池动态模型的建立一方面从分析内在机理出发，另一方面借助试验测试来拟合非线性变量之间的关系，建模的基础是确定电动势以及内阻的特性函数。

蓄电池仿真模型总成如图 4.5 所示，包括开路电压和内阻计算子模块、功率限制子模块、负载电流计算子模块、SOC 计算子模块、蓄电池散热子模块等。

蓄电池所容纳的充电量被看作常数，并受到最小开路电压的限制。电池放电过后需要重新补充的电量受到库仑定律的影响，最大充电量受到电池最大开路电压限制。当电池完全被当作一个已知内阻的电压源时，与之相连接的部件(如电动机)将被看作耗能元件。电池的输出功率受等效电路输出的最大功率、电动机功率、控制器接受的最大功率的影响。

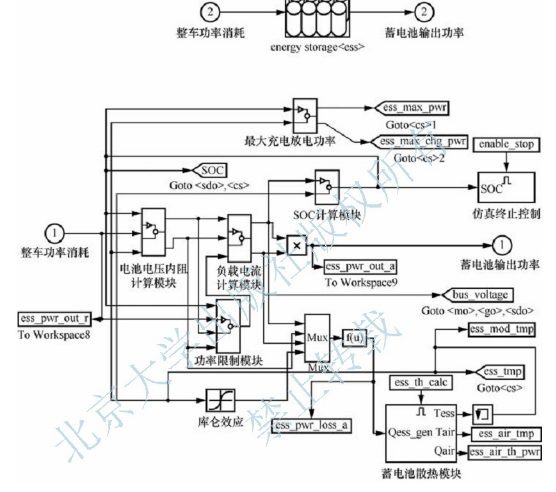


图 4.5　蓄电池仿真模型总成

3. 车身仿真模型

车身仿真模型如图 4.6 所示，包括滚动阻力、坡度阻力、迎风阻力、加速阻力计算子模块，以及汽车车速计算子模块。

电动汽车的车速是评判电动汽车的一项重要指标，所以汽车车速计算子模块在模型总成中也具有相当重要的作用。通过该模块计算出汽车行驶车速，从而推算出汽车的行驶阻力，根据车轮反馈而来的汽车需要的驱动力和线性速度，计算出传递给汽车所需要的驱动力以及更新下一刻车速。

4. 主减速器和变速器仿真模型

主减速器仿真模型总成如图 4.7 所示，通过车轮/轮轴传递的主减速器输出端需要的转矩和转速以及由变速器反馈而来的有效转矩和转速，修正主减速器输入端的转矩和转速，算出主减速器的输出转矩和转速。

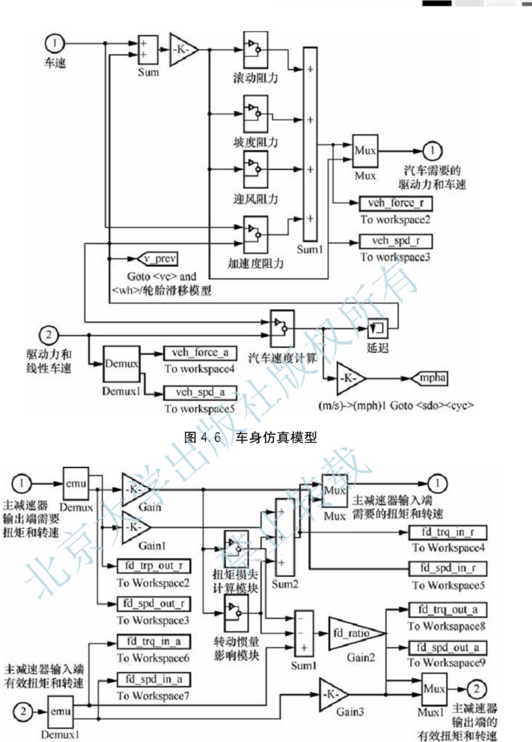


图 4.6 车身仿真模型

图 4.7 主减速器的仿真模型总成

变速器仿真模型总成如图 4.8 所示，由输入输出轴转矩转速计算子模块、变速器控制子模块、转动惯量影响子模块、转矩损失子模块等构成。此模型总成通过主减速器模型传递的变速器需要输出的转矩和转速以及由电动机/控制器模型反馈而来的转矩和转速，修正变速器的输入转矩和转速，算出变速器的输出有效转矩和转速。

主减速器和变速器仿真模型都具有传递、修正转矩和转速的作用。

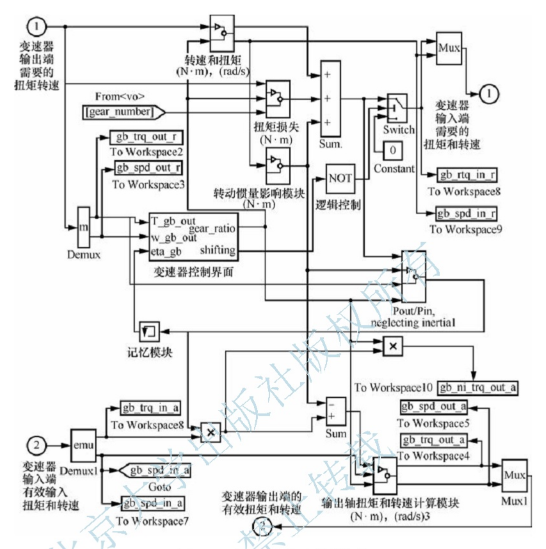


图 4.8　变速器的仿真模型总成

5. 纯电动汽车整车仿真模型

综上所述，将各个模块封装连接组成纯电动汽车的整车模型，如图 4.9 所示。

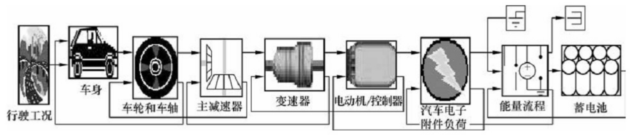


图 4.9　整车仿真模型

6. 仿真结果

汽车在实际行驶过程中不可能长时间在稳定车速下行驶，尤其是在市区行驶时，电动汽车在行驶中常常伴有频繁的加速、减速、怠速、停车等行驶工况。行驶工况应该是在对实际路面和交通状况的大量统计的基础上得出的，能够反映车辆在实际使用中的状况。我

国尚没有建立准确的完整的道路行驶工况，所以选用日本 10－15 工况来进行仿真，仿真结果如图 4.10 所示。

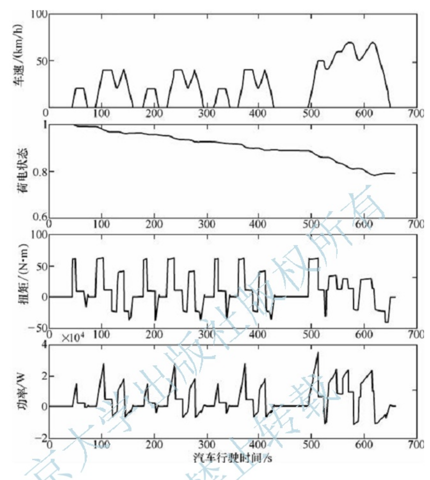


图 4.10 ADVISOR 仿真结果

从图 4.10 所示中的车速、荷电状态、功率、转矩变化曲线可以得出如下结论：电动汽车的匹配参数满足选择的工况要求，行驶稳定；电动汽车得到的转矩、功率满足所需要的动力性要求；荷电状态变化较为平稳。

在实际设计中，如果对所设计的电动汽车的性能不满意，可以对传动系统参数进行优化，直到满意为止。

4.3 纯电动汽车续驶里程

目前，影响纯电动汽车发展的主要因素之一是续驶里程短。为了尽可能地提高纯电动汽车的续驶里程，有必要对其影响因素进行分析。

4.3.1 纯电动汽车续驶里程模型

1．等速行驶续驶里程的计算

汽车在良好的水平路面上一次充电后等速行驶直至消耗掉全部携带的电能为止所行驶

的里程，称为等速行驶的续驶里程。它是电动汽车的经济性指标之一。

汽车以速度 u_a 等速行驶时所需的电动机功率 P 为

$$P=\frac{u_a}{3600\eta_t}\left(mgf+\frac{C_D A u_a^2}{21.15}\right) \tag{4-19}$$

电池携带的额定总能量为

$$W_0=Q_m U_e=G_e q \tag{4-20}$$

式中，Q_m 为电池的额定容量(A·h)；U_e 为电池的端电压(V)；G_e为电动汽车携带的电池总质量(kg)；q 为电池比能量(W·h/kg)。

等速行驶续驶里程为

$$S=\frac{W_0 u_a}{P}\eta_e \tag{4-21}$$

式中，η_e 为电池放电效率。

2. 多工况行驶续驶里程的计算

多工况续驶里程为

$$S=\sum_{i=1}^{k}S_i \tag{4-22}$$

式中，S_i 为每个状态行驶距离(km)；k 为车辆能够完成的状态总数。

4.3.2 纯电动汽车续驶里程影响因素

电动汽车续驶里程的影响因素较为复杂，其中最主要的因素是车载能源问题。续驶里程与电动汽车在行驶过程中所消耗的能量密切相关，影响因素主要来自电动汽车行驶的外部条件和电动汽车本身的结构条件。

1. 滚动阻力系数对续驶里程的影响

轮胎的滚动阻力系数越小，续驶里程越大。所以降低轮胎滚动阻力系数可明显增加电动汽车的续驶里程。特别是对低速、整车质量较大的电动汽车，尤其如此。因此，采用滚动阻力系数小的子午线轮胎，增大轮胎气压等是增加电动汽车续驶里程的重要途径。

2. 空气阻力系数对续驶里程的影响

空气阻力系数越小，续驶里程越大；车速越大，空气阻力系数对电动汽车续驶里程的影响越明显。通过对电动汽车进行流线型设计，底部做成光滑表面，同时取消散热器罩等措施，可以降低空气阻力系数。

3. 机械效率对续驶里程的影响

提高电动汽车动力传动系统的机械效率，能有效地增加电动汽车的续驶里程。电动汽车整车质量越小，行驶速度越低，机械效率对续驶里程的影响越大。

4. 整车质量对续驶里程的影响

整车质量越大，续驶里程越小；并且不同车速时，续驶里程也不相同。为了降低整车总质量，可通过采用轻质材料的方法实现。

5．蓄电池参数对电动汽车续驶里程的影响

蓄电池参数包括很多，这里主要从蓄电池的放电深度、电池比能量、电池箱串联电池个数、电池箱并联电池组数、蓄电池的自行放电等几个方面分析。

1）蓄电池的放电深度

蓄电池的放电深度越大，电动汽车的续驶里程就越大；同时，车速和负荷对续驶里程的影响也很明显。

2）电池比能量

当电动汽车携带的电池总量一定时，电池参数中电池的比能量对续驶里程影响最大，可见提高电池的比能量对提高电动汽车续驶里程意义重大。

3）电池箱串联电池个数对续驶里程的影响

增加每个电池箱串联电池的个数，电动汽车的续驶里程明显增加。这主要是：一方面由于增加了电池的数量，可以增加电池组的总能量储备；另一方面由于电池组的电压增高，在电池放电效率相同的情况下，减小了电池的放电电流，可以增加电池组的有效容量。

在增加电池数量的同时，也增加了电动汽车的总质量，从而增加了电动汽车的能量消耗，降低了电动汽车的续驶里程。但每个电池箱电池数量的增加，会增加电池组的电压，电动汽车的动力性会得到提高。因此，电动汽车动力传动系统的匹配应兼顾电动汽车的续驶里程和动力性。

4）电池箱并联电池组数对续驶里程的影响

在保持电池组总电压的情况下，增加并联电池箱的数量可显著增加电动汽车的续驶里程。这主要是：一方面增加了电池的数量，可增加电池组的总能量储备；另一方面由于并联支路的增加，在各并联支路电池箱不超过额定放电电流的情况下，可以增加电池组总的放电电流，从而增加电池组的额定容量。

增加电池箱并联数量，可提高电池组的放电功率，电动汽车的动力性会显著提高。因此，增加电池箱并联数量可提高电动汽车的动力性和续驶里程。但是，随着电池数量的增加，电池占整车质量的比重和电动汽车的总质量也将增大，这将增加电动汽车的能量消耗，降低电动汽车的续驶里程。

5）自行放电率

蓄电池的自行放电率是指在电池的存放期间容量的下降率，即蓄电池无负荷时自身放电使容量损失的速度。显然，自放电率越大，电池在存放期间的容量的损失就越多，能量的无用损耗越多，相应的电动汽车的续驶里程也就越短。

6．续驶里程其他影响因素的分析

1）行驶工况对续驶里程的影响

行驶工况对电动汽车的续驶里程影响很大。对于恒速行驶，电流随车速的增加而增加，每千米消耗的电能随车速的升高增加，而电池的放电容量则随车速的升高而减小，故其续驶里程随行驶车速的升高而减少。

2）行驶的环境状况对续驶里程的影响

在相同的车辆条件下，电动汽车行驶的道路情况与环境气候对电动汽车行驶的续驶里程有很大影响。如气温的高低一方面对电池的有效容量有很大影响，另一方面也会影

响电动汽车的总效率(电动机效率、机械传动效率和电器元件的效率等)和通风、冷却、空调所消耗的能量。另外，风力的方向与大小、道路的种类(摩擦因数、坡度、平整性)及交通拥挤状况都会使车辆的能量消耗增加或减小，从而使电动汽车的续驶里程有显著的差别。

3）辅助系统和低电压电器系统对续驶里程的影响

电动汽车上制动系统的空气压缩机、转向系统的油泵需辅助电动机驱动，其他还有照明、音响、空调、通风、取暖等电器都需要消耗电池的能量。辅助系统和低电压系统的功率越大，消耗的电能就越大，电动汽车的续驶里程就越小，动力性能也会受到影响。

由此可见，影响电动汽车续驶里程的因素众多，在实际设计中，尽可能综合考虑各种因素的影响，以提高电动汽车的续驶历程。

4.4　纯电动汽车电池管理系统

电池管理系统是集监测、控制与管理为一体的、复杂的电气测控系统，也是电动汽车商品化、实用化的关键。电池管理的核心问题就是 SOC 的预估问题，电动汽车电池操作窗 SOC 的合理范围是 30％～70％，这对保证电池寿命和整体的能量效率至关重要。电动汽车在运行时，电池的放电和充电均为脉冲工作模式，大的电流脉冲很可能会造成电池过充电(超过 80％SOC)、深放电(小于 20％SOC)甚至过放电(小于 0％SOC)，因此电动汽车的控制系统一定要对电池的荷电状态敏感，并能够及时做出准确的调整，这样电池管理系统才能根据电池容量决定电池的充放电电流，从而实施控制，根据各只电池容量的不同识别电池组中各电池间的性能差异，并以此做出均衡充电控制和电池是否损坏的判断，确保电池组的整体性能良好，延长电池组的寿命。

准确和可靠地获得电池 SOC 是电池管理系统中最基本和最首要的任务，在此基础上才能对电动汽车的用电进行管理，特别是防止电池的过充电及过放电。蓄电池的荷电状态是不能直接得到的，只能通过电池特性——电压、电流、电池内阻、温度等参数来推断。这些参数与 SOC 的关系并不是简单的对应的关系。

4.4.1　电池管理系统的功能

电池管理系统是电动汽车的关键组成模块，电池要配备电池管理系统才能正常工作。电池管理系统的功能主要包括以下几项。

1. 实时采集电池系统运行状态参数

实时采集电动汽车蓄电池组中的每块电池的端电压和温度、充放电电流以及电池组总电压等。由于电池组中的每块电池在使用中的性能和状态不一致，因而对每块电池的电压、电流和温度数据都要进行监测。

2. 确定电池的 SOC

准确估测动力电池组的 SOC，从而随时预报电动汽车储能电池还剩余多少能量或储能电池的 SOC，使电池的 SOC 值控制在 30％～70％。



3. 故障诊断与报警

当蓄电池电量或能量过低需要充电时，及时报警，以防止电池过放电而损害电池的使用寿命；当电池组的温度过高，非正常工作时，及时报警，以保证蓄电池正常工作。

4. 电池组的热平衡管理

电池热平衡管理系统是电池管理系统的有机组成部分，其功能是通过风扇等冷却系统和热电阻加热装置使电池温度处于正常工作温度范围内。

5. 一致性补偿

当电池之间有差异时，有一定措施进行补偿，保证电池组表现能力更强，并有一定的手段来显示性能不良的电池位置，以便修理替换。一般采用充电补偿功能。设计有旁路分流电路，以保证每个单体都可以充满电，这样可以减缓电池老化的进度，延长电池的使用寿命。

6. 通过总线实现各检测模块和中央处理单元的通信

在电动汽车上实现电池管理的难点和关键在于如何根据采集的每块电池的电压、温度和充放电电流的历史数据，建立确定每块电池剩余能量的较精确的数学模型，即准确估计电动汽车蓄电池的 SOC 状态。

目前，主要是根据实际情况，确定具体纯电动汽车的电池管理系统的功能和形式。

这里以镍氢电池为例，简单介绍其电池管理系统的设计。

4.4.2 电池管理系统的硬件实现

硬件的设计取决于管理系统实现的功能。基本要实现对动力电池组的合理管理，即保证采集数据的准确性、可靠稳定的系统通信、抗干扰性。在具体实现过程中，根据设计要求确定需要采集动力电池组的数据类型；根据采集量以及精度要求确定前向通道的设计；根据通信数据量以及整车的要求选用合理的总线。

电池管理系统的结构如图 4.11 所示。

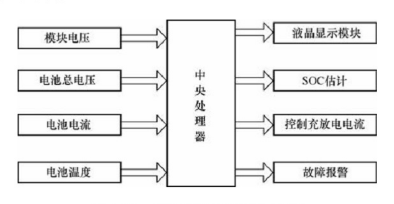


图 4.11　电池管理系统结构示意图

电池的 SOC 一部分是经过对电流的积分得到的，电流信号检测的精度直接影响系统的 SOC 的准确度，因此要求电流转换隔离放大单元在较大范围内有较高的精度，较快的响应速度，较强的抗干扰能力，较好的零飘、温飘抑制能力和较高的线性度。电流转换隔

离放大单元是用电流性霍尔元件将－400A到＋400A的电流(充电电流为正，放电电流为负)转换为电压信号。电流的采样精度要求为1%。

电池的温度是判断电池能否正常使用的关键性参数，如果电池的温度超过一定值，有可能造成电池的不可恢复性破坏。电池组之间的温度差异造成电池组的单体之间的不均衡，从而会造成电池寿命的降低。系统中温度采样单元，是通过总线数字化温度传感器完成，温度采样精度可达到0.5℃。

电压是判断电池组好坏的重要依据，系统要求能得到电池组在同一时刻的电压值的变化和各电池组的值，通过算法来找出有问题的电池组，因此电压的采样精度要求比较高。本系统采用单片机内部自带A/D转换功能，精度可以达到0.1V。

电动汽车中电动机等强电磁干扰源的存在对系统的抗干扰性要求较高，所以要求系统从硬件设计、印制电路板的制作和软件程序方面提高系统的抗干扰性。

本硬件系统是在基于ATMEGA8L单片机进行设计的。

1. 电压采样的实现

电压采样是对电动汽车电池组的电压进行采样，每个电池组由10个单体电池构成。本系统中一共有14个电池组组成电动汽车的动力电池。原理框图如图4.12所示，每个电池为一个电池组。

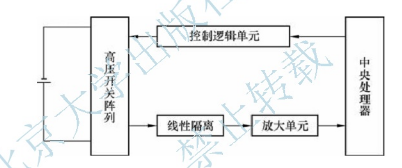


图4.12　电压数据采集方案原理框图

ATMEGA8L通过逻辑控制单元，控制高压开关阵列的通断来采样电池组电压，电压信号在经过线性隔离器件，再经放大后输入到ATMEGA8L的A/D。

2. 电流采样的实现

电流的采样是估计电池SOC的主要依据，因此对其采样的精度，抗干扰能力，零飘、温飘和线性度误差的要求都很高。在这里采用电流传感器LT308(LEM)，该电流传感器是基于霍尔原理的闭环(补偿)电流传感器，具有高的精度、良好的线性度和最佳的反应时间，同时也具有很好的抗干扰能力。其原边的额定电流为300A，满足系统设计的要求。副边的额定电流为150mA，其转换率为1∶2000。供电电源为±12V或±15V。其测量电路如图4.13所示。

LEM的输入电流经过可调电阻R_2转换为电压信号，可调电阻用于调节电流与其对应的电压之间的比例关系。由于从LEM过来的电流是双向的，因此其转换得到的电压是以地(GND)为中心变化的一个正负电压，而选用的模数转换器是单向的，因此必须将其电压提高至0V以上。为此，设计一个加法器(前端的运算放大器)，它的功能是将以0V为中心的正负电压提升至以2.5V为中心的正电压。后端的运算放大器为一个反相器，将由加

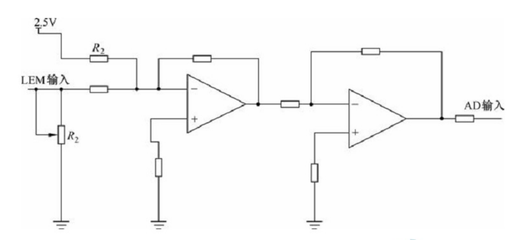


图 4.13 电流采样部分示意图

法器得到地负电压转换为正电压，同时起到功率放大的作用。通过两级运放，最终将信号变为 0～5V 的标准信号进入 A/D 转换器。

电阻 R_1 前端的 2.5V 电压是通过稳压器件调整得到的，它的稳定性关系到系统零点的稳定，对电流采样有重要的意义。采用高精度的电压参考源 AD580，其输出精度为 2.5V±0.4%，完全满足设计要求。

3. 温度采样的实现

温度传感器采用美国 DALLAS 公司继 DS1820 之后推出的增强型单总线数字温度传感器 DS18B20，它在测温精度、转换时间、传输距离、分辨率等方面较 DS1820 有了很大的改进，给用户的使用带来了方便和更令人满意的效果。

温度采集电路如图 4.14 所示。温度检测系统采用直接电源供电方式。当 DS18B20 处于写存储器操作和温度 A/D 变换操作时，总线上必须有强的上拉，上拉开启时间最大为 10μs。由于单线制只有一根线，因此发送接收口必须是三态的。同时由于读写在操作上是分开的，故不存在信号竞争问题。

无论是单点还是多点温度检测，在系统安装及工作之前，应将主机逐个与 DS18B20 挂接，读出其序列号。

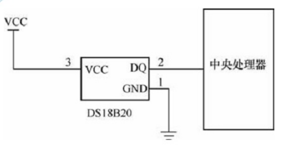


图 4.14 温度测量图

4. 抗干扰措施的设计

由于蓄电池管理系统用在情况比较复杂的电动汽车上，所以干扰信号可以沿各种线路侵入单片机系统。其主要的渠道有 3 条：即空间干扰、供电系统干扰、过程通道干扰。干扰信号对单片机系统的作用可以分为 3 个部位：第 1 个部位是输入系统，干扰叠加在信号上，使数据采集误差增大，特别在前向通道的传感器接口是小电压信号输入时，此现象会更加严重；第 2 个部位是输出系统，使各输出信号混乱，不能正常反映单片机系统的真实输出量，导致一系列严重后果；第 3 个部位是单片机系统的内核，使总线上的数字信号错乱，程序运行失常，内部程序指针错乱，控制状态失灵，单片机中数据被修改，更严重的会导致死机，使系统完全崩溃。

1）硬件抗干扰设计

硬件抗干扰效率高，若硬件措施得当，可以将绝大多数干扰拒之门外。硬件抗干扰技术主要有以下几种。

(1) 电隔离。在输入输出通道上通过光耦器件传输信息可将单片机系统与各种传感器、开关、执行机构从电气上隔离开来，阻挡很大一部分干扰。

(2) 双绞线传输和终端阻抗匹配。长线传输数字信号时利用双绞线，对噪声干扰有较好的抑制效果；可与光耦或者平衡输入接收器和输出驱动器联合使用；在发送和接收信号端必须有末端电阻，双绞线应该与阻抗匹配。

(3) 硬件滤波。RC低通滤波器可以大大削弱各类高频干扰信号(如各类“毛刺”干扰)。

(4) 良好的接地。有两种接地，一种是为人身或设备安全目的，把设备的外壳接地，这种接地称作外壳接地或安全接地；另一种是为电路工作提供一个公共的电位参考点，这种接地称为工作接地。两种接地系统都要设计合理，同时，系统的数字“地”与模拟“地”要分开。

(5) 屏蔽。高频电源、交流电源、强电设备、电弧产生的电火花，甚至雷电，都能产生电磁波，从而成为电磁干扰的噪声源；用金属外壳将器件包围起来，再将金属外壳接地，其对屏蔽各种通过电磁感应引起的干扰非常有效。

2）软件抗干扰设计

在单片机系统中，充分挖掘软件的抗干扰能力可以将干扰的影响抑制到最小。软件抗干扰设计主要是消除模拟输入信号的噪声，程序运行混乱时使程序重新正常运行。

(1) 数字滤波。数字滤波技术可以有效地消除模拟输入信号的噪声。数字滤波技术有：中值滤波、算术平均值滤波、加权平均值滤波等。

(2) 程序运行监视系统。若失控的程序进入“死循环”，通常采用“看门狗”技术使程序脱离“死循环”。通过不断检测程序循环运行时间，若发现它超过最大循环运行时间，则认为系统陷入“死循环”，则对其进行出错处理。

5. 车载CAN通信设计实现

电池管理系统是混合电动车车载电气系统的一部分。它与整车控制系统的通信联系是通过CAN通信来实现的。在电池管理系统中，CAN通信的实现是由外围设置CAN的控制器和接收器组成的通信模块完成的，其的设计原理如图4.15所示。

从图4.15中可以看出，电路主要由4部分构成：微处理器ATMEGA8L、CAN控制器SAJ1000、CAN总线驱动器82C250和高速光电耦合器6N137。

为了增强CAN总线节点的抗干扰能力，SAJ1000的CAN接口不是直接与82C250的TXD和RXD相连，而是通过高速光耦6N137后与82C250相连，这样就很好地实现了总线上各CAN节点间的电气隔离。同时光耦部分电路所采用的两个电源VCC和VDD也完全隔离，否则采用光耦就失去了意义。电源的完全隔离采用的是两个小功率的隔离电源模块来实现的。这些部分虽然增加了接口电路的复杂性，但是却提高了节点稳定性和安全性。

82C250与CAN总线的接口部分也采用了一定的安全和抗干扰措施。82C250的CANH和CANL引脚各自通过一个5Ω的电阻与CAN总线相连，电阻可起到一定的限流作用，保护82C250免受过流的冲击。CANH和CANL与地之间并联了两个30pF的小电

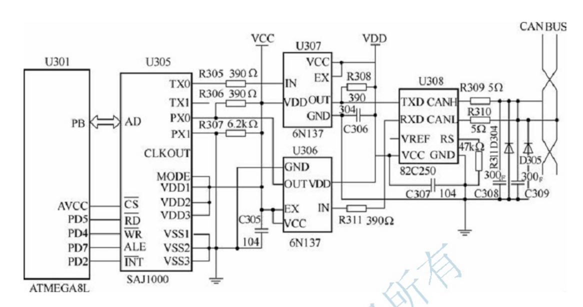


图 4.15 CAN 通信接口设计原理图

容，可起到滤除总线上的高频干扰和一定的防电磁辐射的能力。另外，在两 CAN 总线上与地之间分别接一个防雷击管，可以防止总线与地之间的瞬间干扰。

4.4.3 电池管理系统的软件实现

电池管理系统的软件主要包括 3 个部分：中央处理单元的管理部分、各 ECU 的测量与控制部分、整个系统的通信部分。

电池管理系统的主要任务是检查电池的电压、电流和温度。通过对测量参数的分析，估计电池的剩余容量并做出各种错误报警。系统软件是基于 ATMEGA8L 的 C 语言实现的，主要有以下几部分：

(1) 系统初始化；

(2) 参数检测及滤波；

(3) 剩余容量估计；

(4) 通信；

(5) 数据诊断报警。

1. 系统内存配置

ATMEGA8L 有两种类型的存储器：程序存储器(主要包含可执行程序代码)和数据存储器(主要包含外部变量、静态变量、系统堆栈)。由 C 语言生成的每一块程序或数据存放于存储器空间的一个连续的段中。

在编写软件时，应通过伪指令定义段，并给段分配空间，二进制可执行文件是以段的形式存储的。使用段的好处是模块化编程的需要，可以提供灵活方法来管理代码和目标系统内存空间，编者可以自由地决定把哪些代码归属到哪些段。

C 编译器对 C 语言编译生成 7 个可以进行重定位的代码和数据块，这些块叫做段，这些段根据不同的系统配置以不同的方式被放到存储器中。这 7 个块有两种类型：一种是已初始化的块，另一种是未初始化的块。已初始化的块主要包含数据表和可执行代码，它包括：text、cinit、const 和 switch 这 4 种类型，未初始化的块包括：bss、stack 和 ysmem

这3种类型，他们用于保留存储空间。程序运行时，利用这些空间创建和存储变量。堆栈机制实现以下功能：保护函数的返回地址、分配局部变量、传递函数变量、保护临时结果。堆栈的大小由全局符号 TACK_SIRE 决定(默认值为 1k)。

静态变量和全局变量的存储分配。在C程序中说明的每一个外部或静态变量都是被分配给一个唯一的连续空间，空间的地址由链接器决定，编译器保证这些变量空间分配多个字，以便每个变量按字边界对齐。

使用汇编器可以将汇编语言源程序变为目标文件，用连接器将若干个目标文件连接成可被 CPU 芯片执行的可执行文件。这些目标文件的格式为通用目标文件格式(coff)。连接器通过连接 coff 目标文件建立可执行文件，目标文件中的段是连接时的重要依据，连接器可把段定位到用户系统已配置的存储器中。芯片的存储器配置随应用的不同而不同。用户可以通过 cmd 连接命令文件用连接器伪指令 MEMORY 可以确定目标系统的各种内存配置，当决定了存储器的模式后，可以用连接器伪指令 SECTIONS 确定连接器组合输入端的方法和输出端在存储器中的位置。

Coff 文件会使模块编程和管理变得更加方便，连接器根据连接命令文件(cmd)，将一个或多个 coff 文件连接起来将各个文件的各个段配置到目标系统的存储器中对各个符号和段进行重定位。

2. 参数检测及滤波

电压、电流的检测都是通过 AD 中断采集的。ADC 转换结果为 10 位，存放于 ADC 数据寄存器 ADCH 及 ADCL 中。默认情况下转换结果为右对齐但可通过设置 ADMUX 寄存器的 ADLAR 变为左对齐。在此设计中，采用默认右对齐模式。在读 ADCH 之前又有一次 ADC 转换结束，数据寄存器的数据也不会更新，从而保证了转换结果不丢失。ADCH 被读出后，ADC 即可再次访问 ADCH 及 ADCL 寄存器。ADC 转换结束可以触发中断。即使由于转换发生在读取 ADCH 与 ADCL 之间而造成 ADC 无法访问数据寄存器，并因此丢失了转换数据，中断仍将触发。向 ADC 启动转换位 ADSC 位写“1”可以启动单次转换。在转换过程中此位保持为高，直到转换结束，然后被硬件清零。如果在转换过程中选择了另一个通道，那么 ADC 会在改变通道前完成这一次转换。

使用 ADC 中断标志作为触发源，可以在正在进行的转换结束后即开始下一次 ADC 转换。之后 ADC 便工作在连续转换模式，持续地进行采样并对 ADC 数据寄存器进行更新。第一次转换通过向 ADCSRA 寄存器的 ADSC 写 1 来启动。在此模式下，后续的 ADC 转换不依赖于 ADC 中断标志 ADIF 是否置位。在此设计中采用连续中断模式，以保证数据更新速度和及时性。在中断服务程序中，采集多组数据，剔除两端极值，然后对数据进行平均滤波。在温度数据采集中也同样经过滤波处理。

3. 剩余容量估计

剩余容量估计在系统软件中分3部分：开机参数初始化，数据采集及电流积分，根据估计模型计算。

4. CAN 通信

CAN 通信是电池管理系统与整车控制单元进行通信的中介，电池管理系统把电池的 SOC、温度及相关报警信息发送到 CAN 总线上，中央控制单元接收到数据后对数据进行

处理，进行对整车的控制。在系统中，CAN 总线以报文为单位进行数据传输，节点对总线的访问采取位仲裁方式。报文起始发送节点标识符分为地址标识符和功能标识符，CAN 协议的最大特点是打破了传统的节点地址编码方式，扩展了对系统数据进行编码方式。采用这种方式可使不同的节点同时接收到相同的数据。数据标识符的值越小，帧数据的优先级越高。CAN 控制器监听总线的电平决定发送数据是否有效。

CAN 总线智能节点的软件设计主要包括三大部分：CAN 节点初始化、报文发送和报文接收。熟悉这三部分程序设计，就能编写出利用 CAN 总线进行通信的一般应用程序。当然，如果将 CAN 总线应用于比较复杂的系统中，还应该详细了解有关 CAN 总线错误处理、总线关闭处理等方面的错误。

CAN 通信初始化过程只有在复位模式下进行，主要包括工作方式的设置、接收滤波方式的设置、接收屏蔽寄存器和接收代码寄存器的设置等，在完成 SJA1000 的初始化设置以后，SJA1000 就可以回到工作状态，进行正常的通信任务。

5. 数据诊断报警

在此电池管理系统中，对电池组相关的数据分析处理是关键，也是电池管理系统的核心所在，这中间涉及温度的诊断、电压高低的诊断、电池组好坏的诊断等，并且要在危险情况下做出紧急处理和报警。

如在温度诊断中，利用一总线式温度传感器对电池温度进行检测，当温度高于设定的上下限后，要断开电池组的充电电路。

电压高低也要做相应诊断，以免电动汽车电池组出现过充电或坏电池现象，对于电池组中出现坏电池现象，也在程序中提出了相应的算法，以发现坏电池所在电池组，并显示在液晶屏中，方便人们换电池组。

4.5 纯电动汽车经济性评价指标及行驶能耗

4.5.1 纯电动汽车能耗经济性评价指标

车辆能耗经济性评价常用的指标都是以一定的车速或循环行驶工况为基础，以车辆行驶一定里程的能量消耗量或一定能量可反映出车辆行驶的里程来衡量。为了使电动汽车能耗经济性评价指标具有普遍性，其评价指标应该满足以下 3 个条件：

(1) 可以对不同类型的电动汽车经济性进行比较；

(2) 指标参数数值与整车储存能量总量无关；

(3) 可以直接通过参数指标进行能耗经济性判断。

电动汽车常用评价指标有续驶里程、单位里程容量消耗、单位里程能量消耗、单位容量和单位能量消耗行驶里程、等速能耗经济特性曲线，以及直流比能耗和比容耗等。

1. 续驶里程

续驶里程是纯电动汽车电池组充满电后可连续行驶的里程，可以分为等速行驶里程和循环工况续驶里程。此项指标对于综合评价电动汽车电池组、电动机及传动效率、电动汽车实用性具有积极意义。但此指标与电动汽车电池组装车容量及电压水平有关，在不同车

型和装配不同容量电池组的同种车型间不具有可比性。即使装配相同容量同种电池的同一车型，续驶里程也受到电池组状态、天气、环境因素等使用条件影响而有一定的波动。

2. 单位里程容量消耗

单位里程容量消耗是指电动汽车等速或按工况行驶单位里程消耗的电池组容量。单位为 A·h/km。它作为经济性的评价参数在不同的电池组使用条件下存在一定的误差，在不同车型间不具有可比性，仅适用于电压等级相同、车型相似情况下能耗经济性能的比较或同一车型能耗水平随电池组寿命变化历程分析。

3. 单位里程能量消耗

单位里程能量消耗又可分为单位里程电网交流电消耗和电池组直流电量消耗，单位为 kW·h/km。其中交流电消耗受到不同类型充电设备的效率影响。直流电量消耗仅以车载电池组的能量状态作为标准，脱离了充电机的影响，可以比较直接地反映电动汽车的实际性能。

4. 单位容量和单位能量消耗行驶里程

这两种电动汽车能耗经济性的评价指标分别是单位里程容量消耗和单位里程能量消耗的倒数，单位分别为 km/(A·h)、km/(kW·h)。

5. 等速能耗经济特性曲线

通常以测出速度间隔为 5km/h 或 10km/h 的等速行驶能耗量为标准，在速度-能耗曲线图上连成曲线，称为等速能耗经济特性曲线。但这种评价方法不能反映汽车实际行驶中受工况变化的影响，特别是市区行驶中频繁出现的加速、减速、怠速及停车等行驶工况。

6. 直流比能耗和比容耗

不同车型的纯电动汽车总质量相差很大，因此单位里程能量消耗也有很大差别。为了进行不同车型间的能耗水平分析和比较，引入直流比能耗的概念，即单位质量在单位里程的能耗，单位为 kW·h/(km·t)。此参数可以体现不同车型间传动系匹配优化程度和能量利用效果。

在电压等级相同的情况下，引入比容耗的概念，即单位质量在单位里程的容量消耗，单位为 A·h/(km·t)。

4.5.2 纯电动汽车的能量利用率

车辆的动力性和能耗指标是相互矛盾的，为了增加动力性，要求车辆具有更大的后备功率，但后备功率大，必然降低动力系统的负荷率，从而使能耗经济性变差，因而不能片面追求动力性或能耗经济性，必须取得车辆动力性和能耗经济性之间的优化。上述经济性参数都是单纯考虑能耗所得到的评价指标，综合考虑车辆的动力性，采用能量利用率作为纯电动汽车能耗经济性和动力性综合评价指标。

电动汽车的能量利用率 η_E 可表示为

$$\eta_E = \eta_b \eta_m \eta_t \eta_g \eta_e \eta_d \tag{4-23}$$

式中，η_b 为电池组放电效率；η_m 为电动机效率；η_t 为传动系效率；η_g 为道路阻力利用系数；η_e 为电动汽车的重力利用效率；η_d 为电动汽车驱动力利用效率。



道路阻力利用系数是汽车在一个行驶循环中所需的驱动功与克服实际道路阻力所做的功之比。其表达式为

$$\eta_g=\frac{f_s}{\varphi}=\frac{f_s}{f+i} \tag{4-24}$$

式中，f_s 为车轮滚动阻力系数；φ 为道路阻力系数；f 为道路滚动阻力系数；i 为汽车行驶的道路坡度。

电动汽车的重力利用效率是汽车克服载重量产生的道路阻力所做的功与克服汽车总重力产生的道路阻力所做的功之比。其表达式为

$$\eta_e=\frac{G_e}{G_t} \tag{4-25}$$

式中，G_e 为电动汽车的有效载重量；G_t 为电动汽车总重力。

电动汽车驱动力利用效率是汽车克服汽车总重量产生的道路阻力所做的有用功与汽车驱动轮产生的驱动力所做的功之比。在汽车等速行驶时，其表达式可近似表示为

$$\eta_d=\frac{1}{1+\dfrac{C_D A u^2}{21.15\varphi G_t}} \tag{4-26}$$

能量利用率已经把电池组、电动机、传动系的固有特性与电动汽车实际使用条件相结合，既反映了电动汽车具有的能力，又反映了电动汽车的实际使用效果。因此用它作为电动汽车动力传动系统匹配和经济性的综合评价指标，既反映了电动汽车动力传动系统与使用工况的匹配程度，又能提示传动系统改善的潜力和途径。

4.5.3 纯电动汽车的能耗

电动汽车采用单位里程电能消耗来评价能耗，即

$$e=\frac{E}{S}=\frac{\xi_E E_n}{S} \tag{4-27}$$

式中，e 为电动汽车单位里程能耗(kW·h/km)；E 为电池组充满电时的总能量(kW·h)；S 为电动汽车的续驶里程(km)；E_n 为电池组标称总能量(kW·h)；ξ_E为由于行驶工况和使用环境差别引起的电池组实际可利用总能量占标称总能量的百分比。

去除整车质量的影响，电动汽车比能耗的计算表达式为

$$e_0=e/m \tag{4-28}$$

式中，e_0 为比能耗(W·h/(km·t))；m 为整车质量(kg)。

则续驶里程为

$$S=\frac{E}{e}=\frac{E}{me_0} \tag{4-29}$$

对于电动公交车，整车质量由整备质量和载荷质量两部分组成，即

$$m=m_0+m_1=m_0+n_p m_p \tag{4-30}$$

式中，m_0 为整备质量(kg)；m_1 为载荷质量(kg)；n_p 为乘客数目；m_p 为乘客的人均统计质量(kg)。

公交车在市区行驶，载荷量和乘客数受上下班高峰期、节假日以及沿途的商业布局、停靠站点、路况等因素的影响，是随机性很强的量，载荷量的合理确定关系到电动公交车比能耗计算结果的准确性。

电动汽车续驶里程又可写成：

$$S=\frac{\xi_{\mathrm{E}}E_{\mathrm{n}}}{(m_0+n_{\mathrm{p}}m_{\mathrm{p}})e_0}m_1 \tag{4-31}$$

对从停靠站点 $i(i=1, 2, 3, \cdots)$到停靠站点 $i+1$ 间的站间行驶，能量消耗量为

$$E_i=S_i[m_0+(n_{\mathrm{p}})_i m_{\mathrm{p}}]e_0 \tag{4-32}$$

式中，S_i 为站间行驶里程(km)；E_i 为站间行驶消耗能量(kW•h)。

对公交车行驶一个单程，有

$$\sum_{i=1}^{N}E_i=\sum_{i=1}^{N}S_i m_0 e_0+\sum_{i=1}^{N}S_i(n_{\mathrm{p}})_i m_{\mathrm{p}}e_0 \tag{4-33}$$

式中，N 为公交车单程停靠站点数目。

$$\sum_{i=1}^{N}E_i=S_0 m_0\bar{e}_0+\bar{e}_0\sum_{i=1}^{N}S_i(n_{\mathrm{p}})_i m_{\mathrm{p}} \tag{4-34}$$

式中，S_0 为单程行驶总里程(km)；$\bar{e}_0$ 为单程行驶平均比能耗(W•h/(km•t))。

公交车行驶一个单程消耗的能量除以总里程，即

$$\frac{\sum_{i=1}^{N}E_i}{S_0}=\bar{e}_0\left|m_0+\frac{\sum_{i=1}^{N}S_i(n_{\mathrm{p}})_i m_{\mathrm{p}}}{S_0}\right| \tag{4-35}$$

得

$$m=m_0+\sum_{i=1}^{N}S_i(n_{\mathrm{p}})_i m_{\mathrm{p}}/S_0 \tag{4-36}$$

令

$$\bar{m}_1=\sum_{i=1}^{N}S_i(n_{\mathrm{p}})_i m_{\mathrm{p}}/S_0 \tag{4-37}$$

$$\bar{n}_{\mathrm{p}}=\sum_{i=1}^{N}S_i(n_{\mathrm{p}})_i/S_0 \tag{4-38}$$

式中，$\bar{m}_1$ 为市区行驶等效载荷(kg)；$\bar{n}_{\mathrm{p}}$ 为市区行驶等效乘客数。

公交车市区行驶等效乘客数和等效载荷从能量平衡的角度反映了公交车的平均运载量和平均有效载荷，具有重要的现实意义。若以全天或全年的行驶里程作为评价基准，则可完全反映出运营线路的平均载荷能力，有利于公交运营的经济性核算、电动公交车的比能耗计算和使用成本核算。

4.6 纯电动汽车制动能量回收系统

制动能量回收是把汽车制动时的一部分动能转化为其他形式的能量储存起来，在减速或制动的同时达到回收制动能量的目的，然后在汽车起步或加速时又释放储存的能量。制动能量回收对于提高电动汽车的能量利用率具有重要意义。国外有关研究表明，在存在较频繁的制动与起动的城市工况运行条件下，有效地回收制动能量，电动汽车大约可降低15%的能量消耗，可使电动汽车的行驶里程延长10%～30%。

以四轮轮毂电机驱动的纯电动汽车为例，介绍纯电动汽车制动能量回收系统。

4.6.1 电动汽车制动能量回收系统的结构

电动汽车制动能量回收系统主要由两部分组成：电机再生制动部分和传统液压摩擦制动部分。所以，该制动系统可以视为机电复合制动系统。

再生制动虽然可以回收制动能量并向车轮提供部分制动力，但是其无法使得车轮完全停止转动，制动效果受到电机、电池和车速等诸多条件的限制，在紧急制动和高强度制动条件下不能独立完成制动要求，因此，为了保证汽车的制动安全性能，在采用电机再生制动的同时，必须使用传统的液压摩擦制动作为辅助，从而达到既保证了汽车的制动安全性，又可回收可观能量的目的。

电动汽车再生制动是利用电动机的电动机/发电机可逆性原理来实现的。在电动汽车需要减速或者滑行时，可以利用驱动电动机的控制电路实现电动机的发电运行，使减速制动时的能量转换成对蓄电池充电的电流，从而得到再生利用。由于摩擦制动一般采用液压形式，所以所提到的机电复合制动系统也可以称为再生-液压混合制动系统。从保证制动安全和提高能量利用率的角度来考虑，再生-液压混合制动系统是最适合电动汽车的综合制动系统。

电动汽车的制动系统为双回路液压制动系统＋电动真空助力＋电机再生制动。

电动汽车的制动助力采用电动真空助力，保证踏板力符合习惯大小，同时具有一定的制动脚感。同时，由于前后轮均采用的是盘式制动器，所以需要加装驻车制动器部分。

制动过程中，制动控制器根据制动踏板的开度(实际为主缸压力)，判断整车的制动强度，确定相应的摩擦制动和再生制动的分配关系。前后轴的摩擦制动分配关系由液压系统对前后轮的分配关系实现；制动控制器根据制动强度和电池的SOC值确定可以输出的制动转矩并对前后轴进行分配，然后通过电机控制器控制电动机进行再生制动。在整个制动的过程中，要保证电动汽车的制动稳定性、平稳性，并尽可能多地回收制动能量，延长汽车行驶里程。

4.6.2 电动汽车制动能量回收系统的原理

电动汽车制动能量回收系统的结构原理图，如图4.16所示。电动汽车的制动过程是由液压摩擦制动与电机再生制动协调作用完成的。再生制动系统主要是由轮毂电机、电机控制器、逆变器、制动控制器和动力电池等主要部件组成。汽车进行制动时，制动控制器根据不同的制动工况发出不同的指令，通过电机控制器控制轮毂电机，进行再生制动。

制动能量回收的实现过程如下。

(1) 在制动开始时，能量管理系统将动力电池SOC值发送给制动控制器，当SOC＞0.8时，取消能量回收；当0.7≤SOC≤0.8时，制动能量回收受电池允许的最大充电电流制约；当SOC＜0.7时，制动能量回收不受电池允许的最大充电电流制约。

(2) 制动控制器接收由压力变送器传送的主缸压力信号，并计算出需求的电机再生制动强度上限。

(3) 制动控制器根据电动机转速，计算电机实际能够提供的制动强度。

(4) 比较需求的电机再生制动强度上限和电机实际能够提供的制动强度，并将结果作为电信号发送给电机控制器。

(5) 此时的电动机工作在发电机状态下，可以提供电压恒定流向的电流，再通过逆变

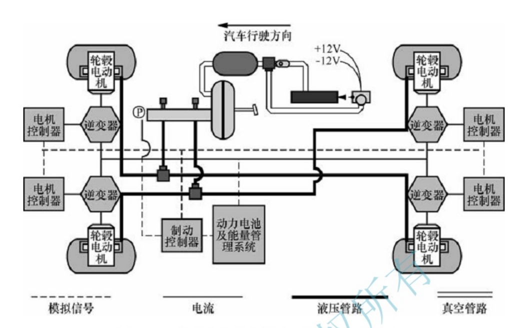


图 4.16　电动汽车制动能量回收系统结构原理图

器限制电机产生的最高电压和对电压进行升压，以便满足电流输出要求，充到动力电池组中。

(6) 为了保护电池，能量管理系统需要时刻监测电池温度，温度过高则停止制动能量回收。

4.6.3　电动汽车制动能量回收控制策略

1. 常见的制动能量回收控制策略

常见的电动汽车主要是采取前轮驱动的形式，因此相应的制动能量回收的控制策略主要关注前、后轮制动器提供的制动力和前轮电机提供的再生制动力三部分之间的关系。由此得到的基于电机再生制动的能量回收控制策略主要有以下三种：前后轴制动力理想分配时的控制策略、前后轴制动力比例分配时的控制策略和最优能量回收控制策略。

(1) 前后轴制动力理想分配时的控制策略。当减速度要求较小时，仅电机再生制动系统工作。随着制动减速度逐渐增大，前后轴制动力将被控制在理想制动力分配曲线上。其中前轴制动力等于再生制动力和机械制动力的总和。当控制系统得到驾驶员的减速度要求时，将根据制动电机的特性和车载能量存储系统的 SOC 值来决定驱动轴制动力由再生制动系统单独提供，还是由机械制动系统和再生制动系统共同提供。

(2) 前后轴制动力比例分配时的控制策略。需要的总制动力较小时，全部由再生制动力提供；当需要的减速度增大时，电机再生制动力所占的比例逐渐减小；机械制动力开始起作用；当总制动力大于一定值时意味着这是一个紧急制动，再生制动力减小到零，机械制动提供所有的制动力；当所需的制动减速度在两者之间时，再生制动与机械制动共同作用。

(3) 最优能量回收控制策略。当总制动力需求小于此时能提供的最大再生制动力时，仅由再生制动力起作用；当总制动力大于此时能提供的最大再生制动力时，总制动力减去最大再生制动力是应该提供的机械制动力，剩余的需提供的机械制动力将分配为前轮机械

制动力和后轮机械制动力。前、后轮机械制动力的分配按照尽量使总的前、后轮制动力分配接近理想制动力曲线。

三种制动控制策略进行比较结果见表4-3。

表4-3 三种常见制动控制策略的比较

	硬件组成的复杂程度	制动稳定性	制动能量回收效率
前后轴制动力理想分配时的控制策略	较复杂，需专门的制动力控制系统	较高	较高
前后轴制动力比例分配时的控制策略	一般，改动较小	中等	中等
最优能量回收控制策略	较复杂，需专门的制动力控制系统	较低	最高

可以看出，三种回收策略各有优缺点，其中，前后轴制动力比例分配时的控制策略既能保证一定的能量回收效率，制动稳定性较理想，而且结构较简单，是目前技术条件下的一种比较好的选择。

2. 四轮驱动下的制动能量回收控制策略

在已经进行的能量回收研究中，电动汽车大多是采用单电机前轮驱动的，能量回收只集中在电动机所驱动的前轮上。汽车采用四轮驱动的形式，前后车轮都是由轮毂电机直接驱动的，所以制动能量回收在前轮和后轮同时存在。

基于上述分析，四轮驱动下的制动能量回收控制策略主要考虑三部分的内容：一是摩擦制动力与电机再生制动力的分配关系；二是前后轴摩擦制动力的分配关系；三是前后轴电机再生制动力的分配关系。

结合对已存在的制动能量回收控制策略的分析，提出一种对前后轴制动力比例分配时的控制策略进行修改后的控制策略，这种策略同时包含前后轮的再生制动。所建立的四轮驱动下的能量回收控制策略的逻辑如图4.17所示。

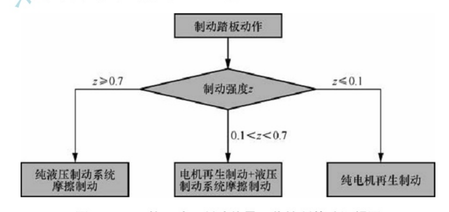


图4.17 四轮驱动下制动能量回收控制策略逻辑图

控制逻辑中主要根据由液压制动压力所反映出的制动强度进行逻辑控制。当需求制动强度$z \leqslant 0.1$时，仅由电机的再生制动力提供整车制动所需的力；随着需求制动力的增加，摩擦制动力逐渐开始起作用，电机再生制动力所占比例逐渐减小；当需求的制动强度$z \geqslant 0.7$时，此时认为车辆进行紧急制动，为了保证制动安全性，制动力完全由摩擦制动来提供；当需求制动强度介于二者之间，即$0.1 < z < 0.7$时，整车的制动力由液压摩擦制动

力与电机再生制动力共同提供。

基于上面的控制逻辑所建立的整车制动能量回收控制策略，如图4.18所示。

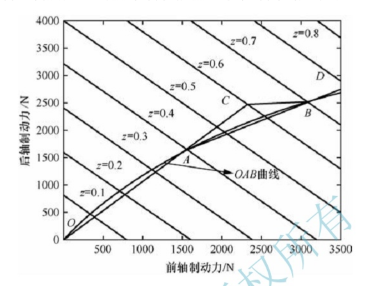


图4.18 四轮驱动下的制动能量控制策略

图4.18中，*OAB* 曲线所示为纯液压系统摩擦制动时前后轴制动力的分配曲线；*OACBD* 为再生-液压制动系统的前后轴制动力的分配曲线，前后轴的摩擦制动力分配是按照一定的比例进行的。

再生-液压制动系统中，总再生制动强度与整车制动强度的关系，如图4.19所示。总再生制动强度是指总的电机再生制动力与整车重量的比值。由于四个轮毂电机是完全相同的，可以认为它们的再生制动工况是相同的，即四个轮毂电机平均分配整车的再生制动力。

结合前面对所研究制动控制策略三个方面的讨论，建立相应的控制算法如图4.20所示。控制算法的总输入量为总制动力，由制动踏板力传感器得到。总再生制动力以及前后车轴的再生制动力由制动控制器中的再生制动力曲线得到，前后轮摩擦制动力分配由制动回路中的高速开关阀实现。控制算法的输出量为前轮再生制动力、后轮再生制动力、前轮摩擦制动力和后轮摩擦制动力。所有的电机再生制动力由电机控制单元来实现控制。

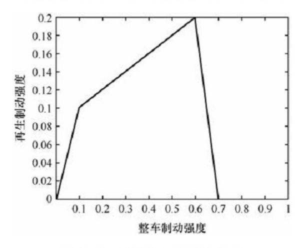


图4.19 总再生制动强度曲线

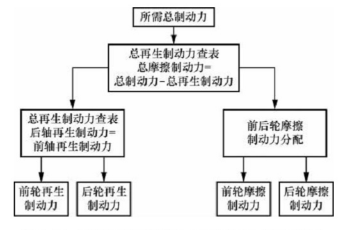


图4.20 四轮驱动汽车再生制动能量回收控制算法

4.6.4 电动汽车制动能量回收系统的仿真

在ADVISOR中建立某四轮驱动电动汽车的制动能量回收仿真模型，选择比较符合中国公路行驶工况的10－15工况和典型的停车制动工况进行仿真，通过仿真结果考察制动过程中制动力的分配、能量回收效率和电池的充电电流等，对所建立的四轮轮毂驱动下的制动控制策略进行评价。

1. 10－15循环工况仿真分析

电动汽车设计为行驶在市区内的代步电动车。行驶时，车速较低，起步/停车频繁。为考察在市区行驶时电动汽车的制动能量回收系统的效果，选择比较符合我国汽车行驶的10－15循环工况进行仿真实验。10－15循环工况中，汽车运行速度如图4.21所示。10－15循环工况总运行时间为660s，平均车速为22.68km/h，最高行驶车速为70km/h，行驶过程中共停车7次。10－15循环工况下，汽车行驶速度变化较小，平均速度较低，制动平缓，符合城市循环过程仿真。

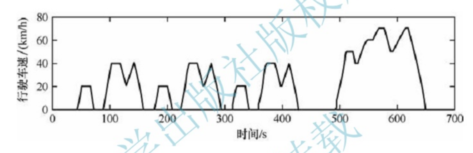


图4.21 10－15循环工况中汽车运行速度

前后车轮再生制动力分配如图4.22所示。制动时，前后车轮获得的再生制动力是相等的。这与所制定的制动能量回收策略有关。车轮上再生制动力的大小还与循环中汽车速度变化的快慢有关。当车速变化较大时，整车的制动强度增大，从而轮毂电机的再生制动强度也增大，再生制动力相应增大。

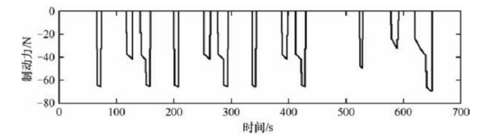


图4.22 10－15循环工况前后车轮再生制动力

前后车轮电机再生制动转矩如图4.23所示。前后车轮电机的再生制动力矩是相同的。10－15循环工况下，整车的制动强度较小，前后车轮所负责的再生制动力相等，电机的再生制动转矩也是相等的。

电池的SOC值的变化曲线如图4.24所示。电动汽车采用全电驱动，在行驶过程中，电池向电动机提供能量，SOC值逐渐减小。在再生制动作用下，电动机向电池充电，电池的SOC值会有一定程度的升高，电机的再生制动转矩越大，再生制动持续的时间越长，SOC值升高得越多。

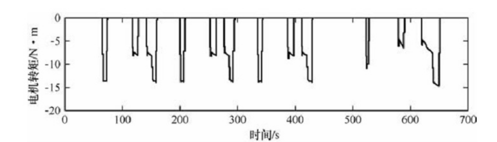


图 4.23　10－15 循环工况前后轮电机再生制动力矩

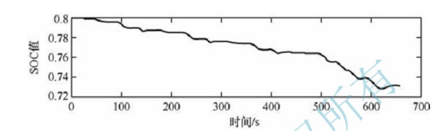


图 4.24　10－15 循环工况电池的 SOC 值

在再生制动的过程中，电动机因其电动机/发电机的可逆性，可以作为发电机将汽车的动能转化为电能，存储在电池中，此时电池显示负电流，表示向电池充电，如图 4.25 所示，此时的充电电流是四个电动机所产生的电流的总和。充电电流的大小与电机的再生制动转矩和再生制动时间有关。

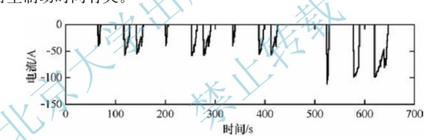


图 4.25　10－15 循环工况电池的充电电流

循环过程中制动能量的回收情况如图 4.26 所示。当电机进行再生制动时，电机向动力电池充电，电池默认为负能量。电机回收制动能量的数量与电机再生制动的强度以及再生制动持续的时间有关，强度越大，时间越长，所回收的能量也越多。除此之外，汽车的行驶车速以及电池的 SOC 值也都是影响能量回收的因素。

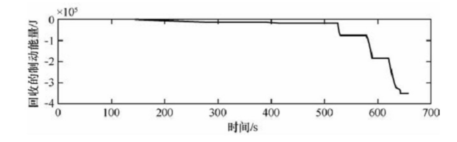


图 4.26　10－15 循环工况制动能量回收曲线

仿真结果表明：在一个 10－15 循环工况中，回收的制动能量为 3.56×10^5J，总的制动能量为 7.28×10^5J，整车消耗的总能量为 1.58×10^6J，制动能量的回收效率为 48.91%，



总能量回收效率为22.5%。采用四轮轮毂电机驱动时，总能量的回收效率高于20%，比前轮驱动下的总能量回收效率高。

2. 停车制动工况仿真分析

汽车从行驶到完全制动停止的过程当中，汽车的动能通过摩擦制动而转化为热能逐步耗散在空气中。电动汽车使用的是再生-液压制动系统，制动过程中有一部分的制动动能可以通过电动机转化为电能存储在电池中。

动能向电机传输的过程中，有一部分消耗在机械摩擦过程中；电机向电池反充电的过程中，还要受到电池的充电电流、充电功率以及电池的SOC值等的限制。所以，只是一部分制动动能可以传递到电池中。

常见的制动停车可以分为紧急制动停车和缓速制动停车两种。紧急制动停车是在紧急状况下，为了使汽车在较短的时间内停止而采取的制动方式，需求的制动力大，制动时间短，制动强度较大。缓速停车制动是指汽车逐步减慢车速，必要时通过制动使汽车速度逐步减小直至车辆完全停止的过程，这一过程一般时间较长，制动平缓，制动强度小，是常见的停车方式。

设置停车制动的初始速度为48km/h，完全制动停车的时间分别为2s和10s。通过仿真分析可以得到，2s制动停车的能量回收效率为6.2%，10s制动停车的能量回收效率为25.1%。10s制动停车工况下汽车回收制动能量的能力远远高于2s制动停车工况，这与再生制动强度、再生制动持续的时间有关。对比两种制动停车工况，10s制动停车工况下，整车制动以再生制动为主，摩擦制动为辅，电机再生制动持续时间较长，能量回收效果较好；2s制动停车工况下，整车的制动以摩擦制动为主，电机再生制动为辅，电机再生制动持续时间较短，能量回收效果一般。

4.7 电动汽车网络管理系统

4.7.1 车载网络技术概述

现今车载网络常见总线有：CAN、LIN、FlexRay、MOST、Bluetooth等。低档汽车只采用低速CAN总线连接少量的ECUs，而高档汽车则同时拥有不同类型的数条总线，高速CAN总线多用于实时性较高的动力总成(Power Train)，如发动机、底盘、变速箱等，FlexRay总线能够满足更高的实时性要求，低速CAN多用于车身控制模块和诊断模块，MOST总线用于车载信息娱乐系统。以宝马七系轿车的网络架构为例，网络架构如图4.27所示。

3条高速CAN总线，其中HS-CAN1用于中心控制系统(Center control systems)、HS-CAN2用于辅助安全系统(Assistance safety systems)；一条低速CAN总线LS-CAN连接舒适系统(Comfort systems)；一条FlexRay总线连接悬架的垂直力系统(Vertical dynamic systems)和横纵向力系统(Longitudinal transversal dynamic systems)；一条MOST总线连接信息娱乐系统(Information communication entertainment systems)；配合使用若干条LIN总线以及一条以太网总线用于上传代码及变量。

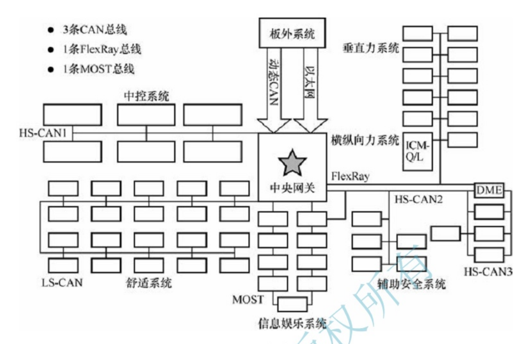


图 4.27　宝马七系轿车的网络架构图

车载网络的各种总线的关系并不是如同新事物代替旧事物一样绝对的替代关系，而是一种相辅相成的配合关系，整车厂可以从实时性、可靠性、经济性等多方面出发，选择合适的总线配合使用，充分发挥各类总线的优势。CAN 总线传输速率一般为 250～500Kb/s，实时性满足现今大多数车辆的通信要求而且成本较低，自然占据优势地位成为主流总线，并且 CAN 总线在未来的 5～10 年内将仍然保持这种优势；而 LIN 总线可以为现有的车载总线提供辅助功能，在一些实时性要求不高、速率要求不高的电控子系统中使用 LIN 总线则可以在不损失性能的条件下大大节约成本；FlexRay 总线伴随线控(X-by-wire)技术产生，传输速率为 5～10Mb/s，在实时性和可靠性方面优势明显，随着车载网络技术的不断发展，车载 ECUs 数量的不断增加，新能源技术的发展必然导致对总线速率和带宽的要求不断上升，并且随着线控技术安全性的不断提高；FlexRay 总线的发展前景会越来越乐观，很有可能成为下一个主流总线。常见总线速率与其相对成本的比较，如图 4.28 所示。

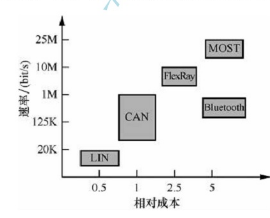


图 4.28　总线成本与速率比较

综合对比各种总线的优势与劣势，由于 CAN 总线具有较高的可靠性和性价比，非常适合作为车载 ECUs 间的通信媒介，在现今的轿车设计中，CAN 总线已成为标准配置，奔驰、宝马、劳斯莱斯、美洲豹、大众、沃尔沃、雷诺等世界知名品牌的汽车都采用 CAN 总线实现控制器间的互连。充分利用 CAN 总线和 LIN 总线的各自优势，采用 CAN＋LIN 的混合模式设计整车网络结构，LIN 总线的使用减少了硬件方面的开销，可以提高整车系统的性价比。

1. CAN 总线

为适应“减少线束的数量”、“通过多个 LAN，进行大量数据的高速通信”的需要，1983 年德国电气商博世公司开始策划一种现场总线；1986 年博世公司在 SAE 会议上发布面向汽车的 CAN 通信协议；1992 年，世界上第一辆采用 CAN 总线的汽车梅赛德斯奔驰下线；1993 年，ISO 组织发布 CAN 国际标准 ISO 11898 及 ISO 11519；2007 年，ISO 组织发布最新 CAN 标准。

目前，CAN 总线协议的国际标准有：ISO 11898-2(高速 CAN)，ISO 11898-3(容错 CAN)和 ISO 11898-4(TTCAN)。并且，CAN 总线协议已经成为国际汽车网络标准中的 B 和 C 类网络标准。

CAN 总线定义的通信接口集成了物理层和数据链路层的功能，负责处理通信数据的帧。CAN 协议的最大特点就是抛弃了对通信数据的站地址编码技术，而采用块编码技术。CAN 总线数据帧由标识符、数据、CRC 校验码三部分组成。其中，标识符由(标准帧)11 位或(扩展帧)29 位组成，在 CAN2.0B 的标准中约定了帧标识符的前七位不能同时为零。采用这种数据帧格式，使不同节点能同时接收同一数据信息。数据段长度最多为 8 个字节，这一般都能满足工业控制中常使用的控制命令、工作状态及检测数据传输的要求。而且，8 个字节信息的传输只需很少的总线传输时间，这就保证了网络通信的实效性。CAN 协议帧采用 CRC 检验法，并提供处理错误的方案，保证报文数据通信的可靠性。CAN 总线主要特性如下：

(1) 多主控制。在总线空闲时，所有的单元都可开始发送报文(多主控制)。最先访问总线的单元可获得发送权(CSMA/CA 方式)。多个单元同时开始发送时，发送报文优先级 ID 高的单元可以获得发送权。

(2) 报文的发送。在 CAN 协议中，所有的报文都以固定的格式发送。总线空闲时，所有与总线相连的单元都可以开始发送新报文。两个以上的单元同时开始发送报文时，根据标识符(Identifier，以下称为 ID)决定优先级。ID 并不是表示发送的目的地址，而是表示访问总线的报文的优先级。两个以上的单元同时开始发送报文时，对各报文 ID 的每个位进行逐个仲裁比较。仲裁获胜(被判定为优先级最高)的单元可继续发送报文，仲裁失利的单元则立刻停止发送而进行接收工作。

(3) 系统的柔软性。与总线相连的单元没有类似于“地址”的信息。因此在总线上增加单元时，连接在总线上的其他单元的软硬件及应用层都不需要改变。

(4) 通信速度。根据整个网络的规模，可设定适合的通信速度。在同一网络中，所有单元必须设定成统一的通信速度。即使有一个单元的通信速度与其他的不一样，此单元也会输出错误信号，妨碍整个网络的通信。不同网络间则可以有不同的通信速度。

(5) 远程数据请求。可通过发送“遥控帧”请求其他单元发送数据。

(6) 错误检测功能、错误通知功能、错误恢复功能。所有的单元都可以检测错误(错误检测功能)。检测出错误的单元会立即同时通知其他所有单元(错误通知功能)。正在发送报文的单元一旦检测出错误，会强制结束当前的发送。强制结束发送的单元会不断反复重新发送此报文直到成功发送为止(错误恢复功能)。

(7) 故障封闭。CAN 总线可以判断出错误的类型是总线上暂时的数据错误(如外部噪声等)还是持续的数据错误(如单元内部故障、驱动器故障、断线等)。由此功能，当总线

上发生持续数据错误时，可将引起此故障的单元从总线上隔离出去。

(8) 连接。CAN 总线是可同时连接多个单元的总线。可连接的单元总数理论上是没有限制的。但实际上可连接的单元数受总线上的时间延迟及电气负载的限制。降低通信速度，可连接的单元数增加；提高通信速度，则可连接的单元数减少。

CAN 总线协议已经成为当前国际汽车领域主流车载网络协议，国内主要的汽车制造商也正在积极研究开发这种技术。美国汽车工程师协会(SAE)基于 CAN 总线协议定义了 A、B、C 等三类车载网络类型，其主要内容如下：

A 类：允许在同一总线上节点间进行多路信号的发送和接收，并适用于低速率数据传输的情况。主要针对传感器或执行器等数据传输速率为 1～10Kb/s 的低速网络，一般应用在座椅调节、电动门窗开关升降等车身控制模块之中。但是，由于速率太低，始终不能成为各大汽车制造商共同遵循的协议。为解决此问题，Motorola、BMW、Audi、VCT 等公司共同成立了 LIN 协会，在此协议的基础上推出了 LIN 协议标准。

B 类：节点之间数据传输采用多主的总线模式，取消了冗余的系统组件。适用于需要将多种功能集成在一个模块之中的情况，一般在汽车电子控制中心、故障诊断、安全气囊、仪表显示等模块中使用。这类型的总线采用的标准是低速 CAN 总线协议，即 ISO 11591，其传输速率在 100Kb/s 左右。

C 类：与 B 类的定义类似，但主要是针对高速率的数据传输。它一般在发动机控制、悬架控制、ABS 等实时控制系统中应用。欧洲的汽车制造商基本上采用的都是高速 CAN 总线标准，即 ISO 11898，其传输速度通常为 125Kb/s ～1Mb/s 。

2. LIN 总线

LIN(Local Interconnect Network)是一种低成本、单线式、串行通信网络，用于实现汽车分布式电子系统之间的数据通信。LIN 的目标是为现有汽车网络提供一种低速总线技术标准，它能满足 CAN 总线所不能提供的带宽和功能，比如传感器和执行器的通信，使用 LIN 总线可大大节省成本。在使用 LIN 总线的网络中，电控单元的集成是将汽车上分布的智能 ECU 连成一个局部网络，如将门上的电动窗、集控门锁、电动后视镜连成一个局部网络，然后再通过网关将这个网络挂接到车辆的主体网络中去，LIN 总线和 CAN 总线可以通过网关来完成信息交换。LIN 的标准简化了现有的基于多路解决方案的低端 SCI，同时降低了汽车电子装置的开发、生产和服务费用。LIN 的开发应用速度很快，这是由于其开发环境简单，可以利用 C 或者 C＋＋进行编程，系统连接不繁琐，且网络性能优良，稳定性好。LIN2.1 主要特性如下：

(1) 数据格式。LIN 总线的通信基于 SCI(DART)数据格式，媒体访问采用单主节点、多从节点的方式。

(2) 节点数量。一条 LIN 总线最多可以连接 16 个节点。

(3) 传输速率。LIN 采用低成本的单线连接，传输速度最高可达 20Kb/s。

(4) 同步。不需要进行仲裁，同时在从节点中无须石英或陶瓷振荡器，只采用片内振荡器就可以实现自同步。

(5) 硬件接口。基于常用的 UART/SCI 硬件接口，以及相应的软件，或作为纯粹的状态机，从而保证较低的成本。

(6) 网络通信具有可预期性。

（7）支持多包报文传输。

（8）支持诊断功能。

LIN技术规范中，除定义了基本协议和物理层外，还定义了开发工具和应用软件接口。因此，从硬件、软件以及电磁兼容性方面来看，LIN保证了网络节点的互换性。这极大地提高了开发速度，同时保证了网络的可靠性。

3. FlexRay总线

FlexRay是戴姆勒克莱斯勒公司的注册商标。FlexRay联盟(FlexRay Consortium)推进了FlexRay的标准化，使之成为了新一代汽车内部网络通信协议，它起源于“X-by-Wire”(线控操作)技术，关注当今汽车行业的一些核心需求，包括更快的数据速率，更灵活的数据通信，更全面的拓扑选择和容错运算。

因此，FlexRay可以为下一代的车内控制系统提供所需的速度和可靠性。CAN网络最高性能极限为1Mb/s。而FlexRay两个信道上的数据速率最大可达到10Mb/s，双通道总数据速率可达到20Mb/s，因此，应用在车载网络，FlexRay的网络带宽可能是CAN的20倍之多。

FlexRay还能够提供很多CAN网络所不具有的可靠性。尤其是FlexRay具备的冗余通信能力可实现通过硬件完全复制网络配置，并进行进度监测。FlexRay同时提供灵活的配置，可支持各种拓扑，如总线、星型和混合拓扑。设计人员可以通过结合两种或两种以上的该类型拓扑来配置分布式系统。

FlexRay可以进行同步(实时)和异步的数据传输，来满足车辆中各种系统的需求，如分布式控制系统通常要求同步数据传输。

为满足不同的通信需求，FlexRay在每个通信周期内都提供静态和动态通信段。静态通信段可以提供有界延迟，而动态通信段则有助于满足在系统运行时间内出现的不同带宽需求。FlexRay帧的固定长度静态段用固定时间触发(fixed-time-trigger)的方法来传输信息，而动态段则使用灵活时间触发的方法来传输信息。

FlexRay不仅可以像CAN和LIN网络这样的单信道系统一般运行，还可以作为双信道系统运行。双信道系统可以通过冗余网络传输数据，这也是高可靠系统的一项重要性能。

4. MOST总线

汽车娱乐多媒体系统已经设计出来并被配置到高档汽车上。这种系统需要高速网络来支持，而作为速率不能超过1Mb/s的CAN总线无法满足这种网络通信需求。为此，国际大汽车制造商推出了以光纤为总线传输媒介的MOST(Media Oriented Systems Transport，面向媒体的系统传输)总线技术。这种总线的传输速度最高可以达到25Mb/s。

MOST的最初构想始于20世纪90年代中期，作为宝马公司、戴姆勒克莱斯勒公司、Harman/Becker公司(音响系统制造商)和Oasis Silicon Systems公司之间的一项联合协议；1998年，MOST Cooperation成立，由它控制总线的定义工作；2001年，MOST技术首次量产使用在BMW7系上；2003年，成为首个支持DVD内容传输的车载网络；2004年，MOST总线用于多款量产车型；2006年，在美国出现首辆使用MOST的量产车；2007年，以丰田为首的日本汽车厂商开始采用该技术。

MOST总线专门用于满足要求严格的车载环境。这种新的基于光纤的网络能够支持

24.8Mb/s 的数据速率，与以前的铜缆相比具有减轻重量和减小电磁干扰(EMI)的优势。MOST 传输协议由分割成帧的数据块组成，每一帧包含流数据、分组数据和控制数据。在物理层上，传输介质本身是有塑料保护套、内芯为 1mm 的 PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)光纤，OEM 供应商可以将一束光纤像电线一样捆成光缆。光纤传输采用 650nm 的 LED(红色)发射器(650nm 是 PMMA 光谱响应中的低损耗“窗口”)。数据以 50Mbaud、双相编码的方式发送，最高数据速率为 24.8Mb/s。

MOST 的定义是非常普通的，允许采用多种拓扑结构，包括星形和环形，大多数汽车装置都采用环形布局。一个 MOST 网络中最多可以有 64 个节点。一旦汽车接通电源，网络中的所有 MOST 节点就全部激活，这对低功耗、停电模式设计是一大重点，包括系统处在该种状态下的功耗量以及如何进入状态。MOST 节点在通电时的默认状态是直通(Pass-throught)，即进入的数据从接收器直接传送至发射器，以保持环路的畅通。

MOST 的数据传送使用 512b 的帧，以及 16 个帧的块。帧的重复率为 44.1kHz(每帧 22.67ms)，每个帧的内部除了前导码和其他内部管理位以外，还包含有同步数据、异步数据和控制数据。总线是完全同步的，设计师可将网络内的任何设备指定为主设备，其他所有节点都从主设备处获得自己的时钟。网络完全是即插即用的，当上电或有连接改变时，有一个寻找设备的过程。主节点上保持着一个所连设备的中心注册处。

4.7.2 电动汽车网络信号分析

该电动汽车车载网络中的电子设备主要包括：车载显示单元(DCU)、车身控制模块(BCM)、电池组管理系统(BMS)、电机控制单元(ISU)、太阳能电池板控制单元(SPCU)等。

根据触发条件的不同，CAN 网络中传输的信号可以分为事件型、周期型、混合型三种传输模式。电动汽车的信号量远远大于传统汽车，虽然总线上信号量较多，但是可以按照发送的性质将其分为两类：突发性信号和周期性信号，而不同性质的 CAN 信号用不同的接收方式保证其可靠性和实时性。

周期性信号：电池组管理系统(BMS)、电机控制单元(ISU)、太阳能电池板控制单元(SPCU)等模块中的信号大多为周期性传递的，信号传递速度快，从接收到处理完成的时间间隔需要尽可能小，不能超过信号的发送周期，如果不能及时处理信号则很可能造成数据堵塞，甚至可能会影响动力系统的控制性能。

突发性信号：车载显示单元(DCU)、车身控制模块(BCM)、智能空调模块(HVAC)等模块发送的信号多为突发性信号。这些信号多为一些按键数据和对一些开关量的控制，特点是信号发送频率不固定且对数据到达的先后顺序没有特别的要求。

该电动汽车的车载电子设备有两种不同性质的 CAN 总线数据流，因此合理的网络结构可以减少微处理器(MCU)的负载、提高控制系统的性能；反之，不合理的网络结构会加大 MCU 的负载，降低系统性能，甚至造成 CAN 报文丢失，影响控制精度。

4.7.3 电动汽车网络结构

该电动汽车的网络结构主要指混合动力轿车 CAN 总线网络的硬件拓扑结构，结构设计是整车网络设计的基础，网络结构设计的好坏直接影响整车控制系统的性能。电动汽车的整车控制系统在控制方式上采用分布式控制，总线上各控制器节点无主从之分，各控制

器之间通过信号的传递实现控制。

将信息交换比较密集并且具有相同数据性质的 ECU 放在一个子网中，即采用双子网结构，不仅满足了电动汽车的设计要求，同时可降低成本且易实现。然后，根据各子网控制系统的要求确定每个子网的 CAN 总线通信速率，根据通信速率采用合适的总线控制器，两个子网之间通过网关的连接实现信息共享。基本网络拓扑结构如图 4.29 所示。

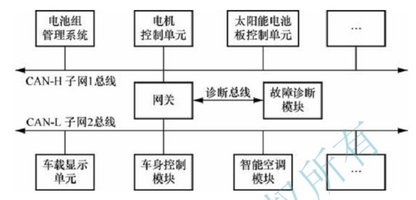


图 4.29 电动汽车网络拓扑结构图

该车载网络分为两个子网，子网 1 中 CAN 总线数据主要是周期性数据，且数据处理周期较短，为减少 CAN 总线数据的通信延时提高网络的实时性，采用双线式高速 CAN 总线(ISO 11898－3)，并将通信速率定位于 250Kb/s。子网 2 中主要为一些车身舒适性系统的突发性数据，比如一些按键数据和开关量数据等，此类数据对处理速度要求较低，为提高网络的容错性，采用容错式低速 CAN 总线(ISO 11519－2)，通信速率为 125Kb/s。采用容错性 CAN 总线时，当两条差分线中的一根发生短路或者断路时，该总线可变为单线运行模式，此时采用地线作为电平参考，依然可以完成数据通信。

两个子网之间采用网关实现数据传递。网关通过两个不同的总线控制器和驱动器连接到两个子网中，同时接收两个子网中的 CAN 报文并进行过滤和转发，将属于该子网的报文发送到该子网，反之将不属于该子网的报文过滤掉。网关留有符合 ISO 11969 的诊断接口，为所有车载电子设备提供诊断和故障处理功能，设备诊断协议参照 ISO 15765。

4.7.4 电动汽车网络性能评估

要对电动汽车 CAN 总线网络设计进行评估，必须确定网络性能的评价指标。由于 CAN 总线采用了 CSMA/CD(带有冲突检测的载波监听多路存取)的方式解决总线数据的冲突，所以网络中报文的传输很可能被比自身更高级的报文所推迟，极端情况下某些数据无法在规定的时间内完成传输，造成数据堵塞。为保证数据传输的可靠性，必须在设计阶段对网络进行评估。网络性能评价指标主要有帧传输时间、帧发送延时和网络可调度性。

1. 帧传输时间

为了得到准确的数学模型，首先引入帧传输时间这一概念，SAEJ1939 基于 CAN2.0B，所以对于 CAN 总线帧的传输时间基于 29 位标识符计算。由 CAN 总线规范 2.0B 可知，CAN 总线帧由帧起始(1 位)、仲裁段(32 位)、控制段(6 位)、数据段(0～8 个字节)、CRC 段(15 位)、ACK 段(2 位)、帧结束(7 位)组成。再加上相邻两帧之间的间隙(3 位)，并考虑到 CAN 总线的位填充机制，则每个 CAN 总线帧发送的时间可以表示为

$$C_m = \left(66 + 8l + stuff_1 + \frac{15 + 8l}{4}\right)\tau_{bit} \quad (4-39)$$

式中，C_m 为帧传输时间；l 为 CAN 总线帧中数据的长度；$stuff_1$ 为帧起始、仲裁段和控制段；τ_{bit} 为总线上传输 1 位数据所需的时间。

$stuff_1$ 共 39 位，是 CAN 总线位填充机制产生的多传输位，这部分对于同一个标识符的数据帧是一个定值，但是由于数据段和校验段的数据是不固定的，为了建立有效指标，书中建模选用最差情况考虑，即数据段和校验段的数据全为 0 或者全为 1。τ_{bit} 与网络的传输速率有关，是传输速率的倒数。

2. 帧发送延时

CAN 总线数据链路层采用 CSMA/CD 对总线上同时传输的数据进行仲裁。CSMA/CD 的仲裁机制确保了信息和时间均不会损失，但是同时也会造成低优先级的数据可能被高优先级的数据延迟，所以本文引入另外一个重要概念：帧发送延时。

为了正确合理地评估网络性能，书中依然考虑最差的情况，即网络中每个帧的发送延时是比其优先级高的帧发送时间之和再加上正在发送的比其优先级低的帧的发送时间，帧的发送延时为

$$D_m = T_{hp} + \max(C_m) \quad (4-40)$$

式中，D_m 为帧发送延时；T_{hp} 为高优先级数据发送造成的延时。

如果不考虑 CAN 总线的错误处理机制，T_{hp} 则可以认为是所有高优先级数据发送时间的和，T_{hp} 可以表示为

$$T_{hp} = \sum_{k=0}^{n} C_k \quad (4-41)$$

式中，n 为现有网络中比发送数据优先级更高的 CAN 总线数据帧的个数。

3. 网络可调度性

网络中每一个 CAN 总线数据帧都有一个有效时间，如果没有在有效时间内发送成功，那么可以认定此数据是无效数据。如果每个数据帧都能在有效时间内完成传输，那么则称该网络是可调度的，否则，这个 CAN 总线网络就可能有总线数据不能够在有效时间内发送的情况发生，为避免这种现象的发生就要对网络的可调度性进行计算。

网络的可调度性是指网络中每个报文是否能在指定时间内完成传输，表征了网络中数据的有效传输性能。对式(4-39)进行简化，考虑帧起始、仲裁段和控制段(共 39 位)所有位都是显性的极限情况，由于 CAN 总线数据的发送采用位填充机制，所以长度为 l 的 CAN 总线数据帧最长发送时间可表示为

$$C_m = \left(66 + 8l + \frac{54 + 8l}{4}\right)\tau_{bit} \quad (4-42)$$

由式(4-42)可以得出网络中所有 CAN 总线帧的发送时间，如果每个 CAN 总线帧都可以在“有效时间”内内完成传输，则认为这个网络是可调度的，否则认为网络不可调度。

以上计算均采用极限假设，如果极限情况下网络仍可调度，那么每个 CAN 总线帧都可以在“有效时间”内发送成功；反之，如果 CAN 总线网络算出来的结果不可调度，那么理论上将存在 CAN 总线帧不能在“有效时间”内完成传输，说明此时总线的冗余度不够。改善 CAN 总线网络冗余度的方法主要有：增加 CAN 总线数据帧的“有效时间”和

修改数据帧的优先级，但是考虑到增加 CAN 总线帧的“有效时间”会降低 CAN 总线帧的实时性，所以采用修改帧优先级的方法可以较好地改善网络的冗余度。

4.7.5 OSEK 网络管理策略

网络管理的工作主要是通过向网络中各节点发送特定的网络报文，实现节点监控、故障处理，并在总线上一段时间无通信的情况下协调各网络节点同步睡眠，确保网络节点间通信的安全性和可靠性。

OSEK NM 为网络管理提供了两种可供选择的机制：直接网络管理和间接网络管理。直接网络管理是通过逻辑环结构主动广播特定的 NM 报文来实现的。在直接网络管理中，节点进行复杂的状态转换，形成逻辑环结构；通过逻辑环发送报文主动监控和报告其他节点的状态，使得网络中每个节点都能在一定的延迟内获得整个网络的状态信息。间接网络管理同样有状态转换机制，但功能和实现比直接网络管理简单。它通过被动地监听各个站点周期发送的网络报文来获得网络状态，间接网络管理实现网络监控的网络管理报文周期性发送且频率较低，被动监听 NM 报文获得网络状态，常用于中央控制型网络，并配合功能强大的网关作为 NM 主 ECU，但是其状态转化机制较简单，由于实时性不强所以不能标识节点失效确切时间。

1. 逻辑环机制

网络管理中的网络管理报文由网络中较低地址传向较高地址，最后再由最高地址传向最低地址，依次传递形成逻辑环，在形式上类似 802.5 令牌环。逻辑环中所谓的“令牌”是指当节点接收到 Ring 报文的后继节点地址等于自身节点地址时该节点便拥有了 Ring 报文的发送权，在网络中只有一个节点拥有 Ring 报文的发送权。网络管理报文通过依次传递形成逻辑上的环，在物理上是通过主动广播的方式来实现的，当网络管理报文发送以后，网络上的所有节点都能收到该报文，但是只有该报文的目标地址等于网络节点自身地址时才能执行相应动作，即在一定时间间隔(Ttyp)后将自身节点的网络管理报文发送给自身节点的逻辑后继节点。图 4.30 为报文传播方式示意图，图中共有 3 个节点，节点间采用 CAN 总线相互连接，节点间的箭头表示报文的传递方向(前驱节点传向后继节点)，报文形成逻辑环结构。

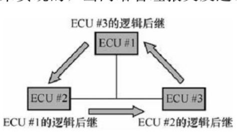


图 4.30 报文传播方式示意图

2. 网络管理报文

1）网络管理报文类型

网络管理报文可分为 Ring 报文、Alive 报文和 Limphome 报文三种。

Ring 报文是网络管理中最基本的一种报文，网络中前驱节点向后继节点传递 NM 报文，其间隔时间为 Ttyp，Ring 报文的依次传递形成逻辑环。

Alive 报文在节点要加入“逻辑环”时或节点被跳过时发送，在形成逻辑环的过程中也是必不可少的。

Limphome 报文是节点进入 Limphome 状态后周期发送的 NM 报文，其间隔时间为 Terr。

2）网络管理协议数据单元

网络管理系统中的节点是指可以访问网络的逻辑实体，一个带有两个通信模块的ECU从网络管理系统的角度看是两个节点。直接网络管理要求各个节点广播相应的控制报文，每个NM报文都包含网络管理协议数据单元(NMPDU)，其格式如图4.31所示。

CAN标识		CAN数据域		
11bits		64bits		
	地址域		控制域	数据域
3bits	8bits	8bits	8bits	48bits
基地址	源地址	目标地址	操作码OpCode	数据

Ring：Sleep.ind=0；Sleep.ack=0	0	0	0	0	0	0	1	0
Ring：Sleep.ind=1；Sleep.ack=0	0	0	0	1	0	0	1	0
Ring：Sleep.ack=1	0	0	1	X	0	0	1	0
Alive：Sleep.ind=0；Sleep.ack=0	0	0	0	0	0	0	0	1
Alive：Sleep.ind=1；Sleep.ack=0	0	0	0	1	0	0	0	1
LimpHome：Sleep.ind=0；Sleep.ack=0	0	0	0	0	0	1	0	0
LimpHome：Sleep.ind=1；Sleep.ack=0	0	0	0	1	0	1	0	0

图4.31　NMPDU的格式

基地址：节点除了收发NM报文，还可能收发COM报文或其他类型的用户自定义报文，基地址(IDBase)由OEM分配，用于区分其他COM报文或其他类型的用户自定义报文。

地址域：包括源ID(SourceID)和目标ID(DestinationID)，每个ID占8位，可以支持256个节点的寻址，满足绝大多数车用网络的需求。其中目标ID只有在控制域为Ring类型时才有意义。

控制域：描述该NM报文的功能，占8位。需要说明的是，OSEK/VDX NM规范中定义了NMPDU的格式，并给出一个实例，实例中操作码OpCode的前5位预留，后三位定义了报文类型。本文未使用OSEK/VDX NM规范中的实例，而是根据实际需要对操作码进行了自定义，按照从左到右的顺序，其中第1、2、5位保留，第3位表示睡眠确认位(Sleep. ack)，第4位表示睡眠指示位(Sleep. ind)，后3位用于区分三种NM报文。第6位设置为1表示报文类型为Limphome，第7位设置为1表示报文类型为Ring，第8位设置为1表示报文类型为Alive。

数据域：该域是可选的，NM本身并不使用该域，这部分可作为一种扩展功能用于在各节点之间传递用户自定义信息，作为应用程序扩展NM的功能或使用NM的逻辑环结构交换数据。

3. 定时器及计数器参数设计

OSEK直接网络管理协议中共描述了5种类型的定时器，见表4-4。

Ttyp定时器：形成逻辑环的典型时间间隔，当自身节点收到Ring报文的目标地址等于自身地址时设置Ttyp定时器，该定时器到时后发送Ring报文给后继节点，网络中每个节点依次传递Ring报文形成逻辑环，所以说Ttyp定时器是逻辑环中两个Ring报文的典型时间间隔。

表 4-4　NM 定时器列表

定时器	描　　述	典型值	说明
Ttyp	两个 Ring 报文的典型时间间隔	100ms	全局
Tmax	两个 Ring 报文的最大时间间隔	250ms	全局
Terr	两个 Limphome 报文的典型时间间隔	1000ms	全局
Twbs	总线进入网络睡眠状态的等待时间	1500ms	全局
Ttx	NM 报文被 DDL 拒绝后，重发的延迟时间	25ms	局部

Tmax 定时器：用于探测逻辑环运行过程中接收报文失败或者发送报文失败的最大时间间隔，超过这个时间间隔仍没有接收(发送)相应的 NM 报文就认为是一次接收(发送)失败，同时将接收(发送)计数器加 1。处于常规状态下的节点在即将发送 Ring 报文之前设定 Tmax 定时器，在成功发送 Ring 报文之后重置 Tmax 定时器，这样便可以探测到此次报文发送是否失败；同样，处于常规状态下的节点在发送一条 Ring 报文之后设定 Tmax 定时器，在成功接收一条 Ring 报文之后取消 Tmax 定时器，这样便可以探测到此次报文接收是否失败。在逻辑环运行过程中如果发生 Tmax 定时器到时，必定是此时的 Ring 报文没有成功发送或者没有被成功接收，所以说 Tmax 定时器是两个 Ring 报文的最大时间间隔。

Terr 定时器：跛行回家状态是一种故障状态，为保证故障的节点不影响其他节点正常通信，该故障节点会向总线网络中发送特殊的 Limphome 报文，且该报文的间隔时间应远远大于常规报文，Terr 就是实现该间隔时间的定时器。

Twbs 定时器：节点在预睡眠状态下会设置 Twbs 定时器，随即进入等待睡眠状态。在等待睡眠状态中如果 Twbs 定时器到时，则节点进入睡眠状态。所以说 Twbs 定时器是总线进入网络睡眠状态的等待时间。

Ttx 定时器：当节点发送的报文被数据链路层拒绝时设置 Ttx 定时器，Ttx 代表 NM 报文请求重新发送的延迟时间。

OSEK 直接网络管理定义了两个计数器：网络管理接收失败计数器(NMrxcount)和网络管理发送失败计数器(NMtxcount)，见表 4-5。

表 4-5　计数器及门限值列表

计数器	类型	描　　述	典型值
NMrxcount	定时器	接收失败计数器，用于检测 NM 接收失效的次数	—
NMtxcount	定时器	发送失败计数器，用于检测 NM 发送失效的次数	—
rx _ limit	门限值	接收失败计数器的门限值	4
tx _ limit	门限值	发送失败计数器的门限值	8

NMrxcount 计数器：用于表示 NM 报文连续接收失败的次数，一旦节点成功接收一条 NM 报文后，NMrxcount 计数器清零。

NMtxcount 计数器：用于表示 NM 报文连续发送失败的次数，一旦节点成功发送一条 NM 报文后，NMtxcount 计数器清零。

rx _ limit 门限值：其典型值为 4，这个值表示如果节点接收报文连续失败 4 次，则节

点会进入跛行回家状态。

tx _ limit 门限值：其典型值为 8，这个值表示如果节点发送报文连续失败 8 次，则节点会进入跛行回家状态。

4. 状态转换

OSEK 直接网络管理中所描述的状态包括：NM 停止、NM 运行、NM 关闭三个大状态，位于层级 0；其中 NM 运行状态下又包括网络初始化、网络唤醒、网络睡眠、主动网络管理、被动网络管理五个子状态，位于层级 1；在网络唤醒状态下，又分为复位、常规运行、跛行回家三个子状态，位于层级 2。其层级和名称对应表详见表 4-6。

表 4-6 NM 状态列表

层级	上级	状态名称	中文对照
0	—	NMOff	NM 停止状态
0	—	NMOn	NM 运行状态
0	—	NMShutDown	NM 关闭状态
1	NMOn	NMInit	网络初始化状态
1	NMOn	NMAwake	网络唤醒状态
1	NMOn	NMBusSleep	网络睡眠状态
1	NMOn	NMActive	主动网络管理状态
1	NMOn	NMPassive	被动网络管理状态
2	NMAWake	NMReset	复位状态
2	NMAWake	NMNormal	常规运行状态
2	NMAWake	NMLimpHome	跛行回家状态

NM 节点状态转换如图 4.32 所示。

节点的基本状态是 NM 停止、NM 运行和 NM 关闭。应用层调用 StartNM()服务函数可实现 NM 停止到 NM 运行的状态转换；调用 StopNM()服务函数可实现由 NM 停止到 NM 关闭的状态转换，NM 关闭状态只是一个暂态，在此状态 NM 会进行一些总线睡眠前的硬件初始化，完成之后即进入 NM 停止状态。

在 NM 运行状态下存在 3 个独立的子状态：网络初始化、网络唤醒和网络睡眠。当自身节点无通信请求时，节点通过一系列状态转换进入网络睡眠状态；当处于网络睡眠状态的节点需要网络通信的时候，就通过本地唤醒或者远程报文唤醒进入网络初始化状态，初始化完成以后随即进入网络唤醒状态。与上述 3 个子状态并列存在另外两个子状态为主动网络管理状态和被动网络管理状态，应用层调用 TalkNM()服务函数可以由被动网络管理状态转换到主动网络管理状态；应用层调用 SilentNM()服务函数可以由主动网络管理状态转换到被动网络管理状，当节点处于被动网络管理状态中，节点不参与网络通信，即只接收报文不发送报文。

在网络唤醒状态下存在 3 个子状态即常规运行状态、复位状态、跛行回家状态。进入唤醒状态的节点首先进入复位状态，然后根据接收发送计数器的值判断是进入常规运行状

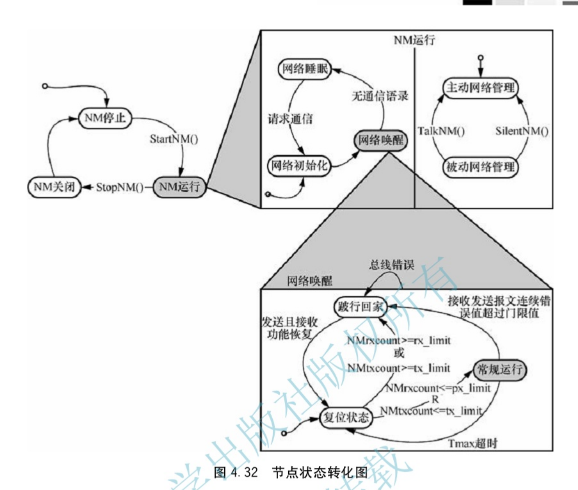


图 4.32　节点状态转化图

态还是跛行回家状态，如果接收发送计数器的值都小于等于门限值则进入常规运行状态，反之进入跛行回家状态；处于常规运行状态下的节点若 Tmax 定时器超时则进入复位状态重启，若接收或发送连续失败的次数超过门限值则进入跛行回家状态，处于跛行回家状态的节点若接收和发送功能恢复则进入复位状态重新判断。此外，总线错误时节点会进入跛行回家状态，总线错误是指 CAN 控制器发送失败计数器累计超过 255 时，节点进入总线关闭(Bus-Off)状态。

5. *逻辑环运行实例*

逻辑环建立过程、新节点加入过程、节点丢失过程以及同步睡眠过程是逻辑环运行过程中常见的过程。实例中共涉及 4 个节点，分别为 ECU＃1、ECU＃2、ECU＃3 和 ECU＃4，假设 4 个节点的地址是由小到大排列的。利用面向对象理论中 UML(统一建模语言)的顺序图来表示这 4 个过程，对象类角色(Class Role)用矩形框图标表示，4 个对象分别为 ECU＃1、ECU＃2、ECU＃3 和 ECU＃4；生命线(Lifeline)用从对象图标向下延伸的一条虚线表示，代表 ECU 节点参与通信的时间；激活期(Activation)又称作控制焦点(Focus of control)，用位于生命线上的一个窄矩形表示，代表 ECU 节点执行动作的期间；消息(Message)表示对象之间的通信，在顺序图中报文用对象角色之间的一条水平箭头线表示，代表所发送的网络管理报文，报文由源地址指向目标地址。

(1) 逻辑环的建立。假设过程开始时，网络中有 3 个节点 ECU＃1、ECU＃3 和 ECU＃4。节点被唤醒后相继发送 Alive 报文，建立逻辑环。

逻辑环建立过程的 UML 时序图如图 4.33 所示。

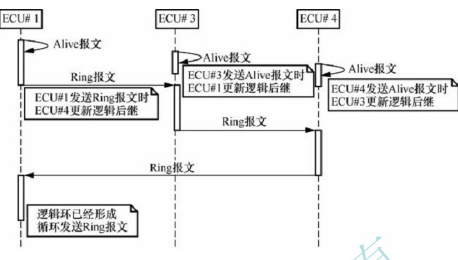


图 4.33　逻辑环建立过程

ECU＃1 节点首先发送 Alive 报文，并设定 Ttyp 定时器；

随后 ECU＃3 节点发送 Alive 报文，当 ECU＃1 节点收到 ECU＃3 节点发送的 Alive 报文后，ECU＃1 节点更新自身逻辑后继为 ECU＃3；

当 ECU＃4 节点发送 Alive 报文时，ECU＃3 节点更新自身逻辑后继为 ECU＃4；

当 ECU＃1 节点设定的 Ttyp 定时器到时后，该节点会向后继节点发送一个 Ring 报文，网络中其余各节点都会收到该条 Ring 报文，其中 ECU＃4 节点会将自身逻辑后继更新为 ECU＃1，此时逻辑环正式建立；

网络中各节点依次发送 Ring 报文则逻辑环稳定运行。

事实上，网络中接收到网络管理报文的各节点会各自进行同样的操作，这个操作过程为常规运行状态下报文的接收过程，此过程包含两个重要的算法，即更新逻辑后继和判断自身是否被跳过，这两个算法的处理过程十分类似。首先要判断是否需要更新逻辑后继，经过一系列 IF 条件判断后，如果结果为“是”，则更新逻辑后继为接收报文的源地址，如果结果为“否”，则不做处理；然后判断自身节点是否被跳过，若判断结果为“是”则向总线上发送一条 Alive 报文，该条 Alive 报文的目标地址即为自身的后继节点(并不是每条 Alive 报文的源地址和目标地址都是自身节点地址)，若判断结果为“否”则不做任何处理；最后判断节点接收到的 Ring 报文的目标地址是否为自身，若为自身则设定 Ttyp 及 Tmax 定时器。

(2) 新节点加入 。假设过程开始时，网络中有 3 个节点 ECU＃1、ECU＃3 和 ECU＃4，此时已经形成逻辑环结构，并相继发送网络管理报文。在 ECU＃3 节点发送完网络管理报文 ECU＃4 节点还未发送期间，ECU＃2 节点申请加入网络。

新节点加入过程的 UML 时序图如图 4.34 所示。

ECU＃2 新节点设置后继节点为自身地址，并向总线广播一条 Alive 报文，该条 Alive 报文的源地址和目标地址都为自身节点地址，网络中接收到该 Alive 报文的其余各节点接收到该报文后，ECU＃1 将自身逻辑后继更新为 ECU＃2；

当 ECU＃4 节点的 Ttyp 定时器到时后发送 Ring 报文给 ECU＃1 节点，ECU＃2 节点接收到该 Ring 报文后，判断并更新逻辑后继为 ECU＃4；

接下来，ECU＃1 节点发送报文给 ECU＃2 节点，ECU＃2 节点此时的后继节点已经

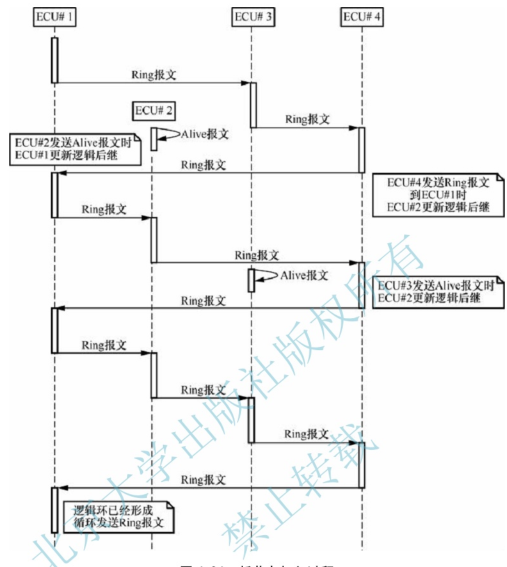


图 4.34 新节点加入过程

更新为 ECU＃4，所以 ECU＃2 节点发送 Ring 报文给 ECU＃4 节点；

当 ECU＃3 节点接收到 ECU＃2 发送给 ECU＃4 节点的 Ring 报文时，判断自身被跳过，那么 ECU＃3 节点向总线上发送一条 Alive 报文；

当 ECU＃2 节点接收到该条 Alive 报文时更新逻辑后继为 ECU＃3，此时逻辑环正式建立，网络中各节点依次发送 Ring 报文则逻辑环稳定运行。

（3）节点丢失 。假设过程开始时，网络中有 4 个节点 ECU＃1、ECU＃2、ECU＃3 和 ECU＃4 已经形成逻辑环结构，并相继发送网络管理报文。某一时刻，ECU＃2 节点丢失。

新节点丢失过程的 UML 时序图如图 4.35 所示。

ECU＃2 节点丢失以后，ECU＃1 节点仍然按照自己的逻辑后继向 ECU＃2 节点发送 Ring 报文；

网络中其余各节点都会收到该报文并设定 Tmax 定时器；

由于 ECU＃2 节点已经丢失，自然不会继续向总线上发送 Ring 报文，Tmax 时间过后，ECU＃1、ECU＃3 和 ECU＃4 节点的 Tmax 定时器同时到时，并相继重启，向总线

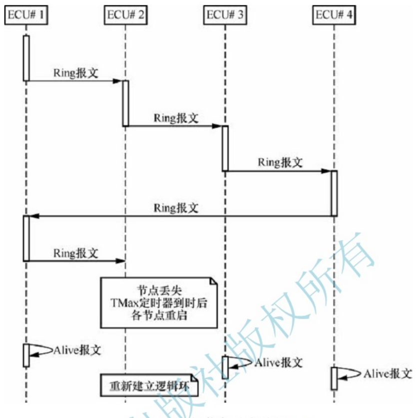


图 4.35　新节点丢失过程

上发送 Alive 报文；

又是一个逻辑环重新建立的过程，该过程与示例 1 中的逻辑环建立过程相同。

(4) 同步睡眠。在 OSEK 直接网络管理协议中，节点的同步睡眠是通过节点状态转换来完成的，所以这一过程是 OSEK 网络管理的核心内容。继续实例(3)中的假设，ECU＃2 节点已经丢失，不参与网络通信，ECU＃1、ECU＃3 和 ECU＃4 节点协调同步睡眠的过程。

同步睡眠过程的 UML 时序图如图 4.36 所示。

此时 ECU＃1 节点满足睡眠条件，该节点将自身的睡眠指示位(Sleep. ind)设置为 1 并向总线发送一条 Sleep. ind＝1 的 Ring 报文，报文发送后，ECU＃1 节点将自身状态设置为常规运行预睡眠(NMNormalPrepSleep)状态，若依然满足睡眠条件则将自身的睡眠确认位(Sleep. ack)设置为 1；

ECU＃3 节点满足睡眠条件，操作与 ECU＃1 节点相同，发送一条 Sleep. ind＝1 的 Ring 报文并将自身状态设置为常规运行预睡眠状态；

ECU＃4 节点不满足睡眠条件，发送了一条 Sleep. ind＝0 的 Ring 报文，那么收到该报文的 ECU＃1 和 ECU＃3 节点发现 ECU＃4 节点不满足睡眠条件则将自身的状态恢复为常规运行状态；

此后各节点会重复刚才的过程，直到 ECU＃4 节点也满足睡眠条件发送一条 Sleep. ind＝1 的 Ring 报文并将自身状态设置为常规运行预睡眠状态；

收到该报文的 ECU＃1 节点自身地址等于该报文的目标地址拥有报文的发送权，由于 ECU＃1 节点此时的状态为常规运行预睡眠状态且睡眠确认位已设置为 1，所以在 Ttyp 定时器到时后 ECU＃1 节点会向总线上发送一条 Sleep. ack＝1 的 Ring 报文；

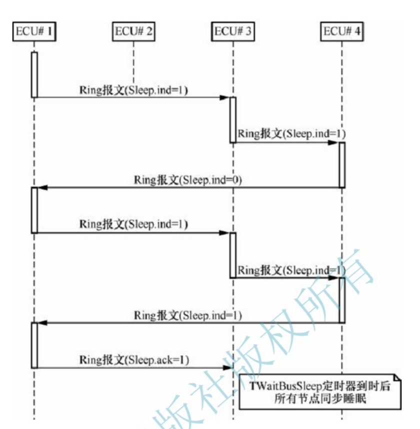


图 4.36　同步睡眠过程

ECU＃1 节点发送完这条报文以后设定 Twbs 定时器并进入常规运行等待睡眠状态，接收到该报文的 ECU＃3 和 ECU＃4 节点同时设定 TWaitBusSleep 定时器并进入常规运行等待睡眠状态；

各节点 Twbs 定时器到时后，各节点进入网络睡眠状态即同步睡眠。

4.7.6　OSEK 网络管理实现

1. 硬件开发环境

(1) MPC5554 开发平台。Freescale 公司推出的 MPC5554 是采用 PowerPC 内核的一款 32 位微控制器，属于 MPC55XX 系列的第一代产品，可用于航空航天、汽车、工业控制等嵌入式系统中。如图 4.37 所示，MPC5554 内部带有浮点运算单元，集成 DSP 运算指令，拥有较高的计算能力，可以满足多任务处理和实时控制的要求。MPC5554 包含 64KB 内部 SRAM，32KB Cache，2MB 内部 FLASH，64 路 eDMA，24 路 eMIOS，64 路 eTPU 通道，2 路 eSCI，4 路 DSPI，3 路 FlexCAN，40 路 12b A/D(可扩展为 64 路)，中断控制器，以及 JTAG，Nexus 调试接口等功能模块。MPC5554 为 416 脚 PBGA 封装，可在 －40～＋150℃的环境下工作，系统时钟可达 132MHz，中断延迟小于 70ns，内部逻辑供电 1.5V，输入/输出供电 3.3V/5V，外部总线接口支持 1.62～3.6V 操作。

(2) 辅助设备。一台预装 CANoe7.1 的 PC 作为上位机进行软件程序开发；Vector 公司生产的 CANcaseXL、CANcardXL 或者 VN7600，这几种硬件设备通常称为“CAN 卡”，内含 CANoe7.1 的硬件驱动及接插件若干，如 DB9 转接头、OBD－DB9 转接头等。

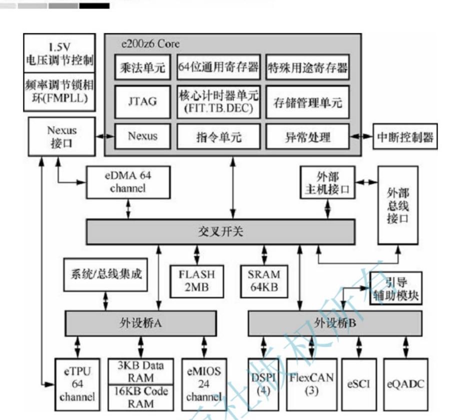


图 4.37　MPC5554 内部结构图

2. 软件模块接口

网络管理模块处于应用层和 CAN 驱动层之间，接口设计图如图 4.38 所示。

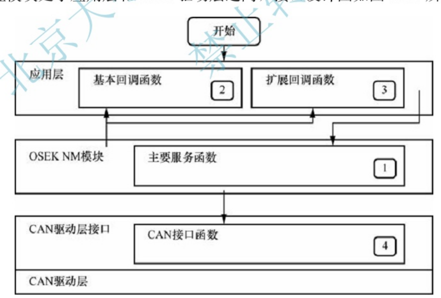


图 4.38　接口设计图

(1) 主要服务函数。实现网络管理软件模块所必需的服务函数，供应用层进行调用。

(2) 基本回调函数。NM 模块为应用层提供的基本回调函数。

(3) 扩展回调函数。NM 模块为应用层提供的扩展回调函数。

(4) CAN 接口函数。CAN 驱动层接口供 NM 模块调用的接口函数，主要包括：CAN

发送函数、发送通知函数、接收确认函数、中断开关程序等。

3. 状态转换功能

依照有限状态机原理设计节点的状态转换功能。有限状态机是根据当前状态以及触发条件进行状态转换的一种机制，是包含一组状态集(state)、一个起始状态(start state)、一组输入符号集(alphabet)、一个映射输入符号和当前状态到下一状态的转换函数(transition function)的计算模型。利用有限状态机模型，可以方便地进行相应的程序设计。软件的主要工作是进行正确的状态切换和在每个状态下执行相应的动作。对于单个状态机处理的程序设计，可以使用“横写法”或“竖写法”两种设计方法。“横写法”设计的核心思想是在事件中判断状态，每个事件被编写为一个事件函数进行处理，事件函数中的不同状态被设计为子函数，在子函数外部进行状态的切换；“竖写法”设计的核心思想是在状态中判断事件，在分支(switch)语句中对所有的状态进行判断，执行相应动作并进行状态切换。

横竖两种写法，实现的功能完全相同，但是“竖写法”隐含了优先级排序，破坏了事件间原有的关系。同时，由于处在每个状态的事件数目不一致，而且事件发生的时间是随机的，“竖写法”使用顺序查询方式，因此大量时间被浪费；“横写法”设计，在某个时间点状态是唯一确定的，延迟时间可以预先准确估算，而且在事件发生时，系统会调用相应的事件函数，在函数里查找唯一确定的状态，并根据其状态执行动作和状态转移，使用这种方式设计的软件思路清晰简洁，效率高，故本文采用“横写法”进行设计。

当一个事件(Event)发生时节点所处的状态是唯一的，根据当前状态(nmCurState)，决定执行动作(Action)，并设置下一状态(nmNxtState)。“横写法”的原理如图 4.39 所示。

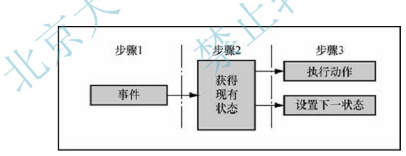


图 4.39 “横写法”原理图

系统中事件(Event)分为三类，分别为：

(1) E1：上层下达的命令事件。

上层调用 StartNM()函数；

上层调用 StopNM()函数；

上层调用 GotoMode(BusSleep/Awake) 函数。

(2) E2：定时器超时事件。

Ttyp 定时器到时；

Tmax 定时器到时；

Terr 定时器到时；

Twbs 定时器到时；

Ttx 定时器到时。

(3) E3：下层报文到达的事件。

接收任意一条网络管理报文；

发送任意一条网络管理报文；

远程唤醒信号。

触发事件分类图如图 4.40 所示。

图 4.40 触发事件分类图

OSEK 网络管理复杂的状态转换是其核心内容，如何用软件实现状态转换是整个软件系统实现的关键所在。

4. 算法设计

OSEK/VDX 直接网络管理的重要任务之一是协调网络中各节点的同步睡眠与唤醒，节点同步睡眠与唤醒是通过状态转换来实现的，而节点状态的转换是通过接收发送网络管理报文来直接实现的。所以下面介绍网络管理模块最重要的两个算法，即常规运行到网络睡眠状态转换算法以及常规运行状态下报文接收过程算法。

(1) 常规运行状态到网络睡眠状态转换算法。以网络中的单个节点为研究对象，应用层调用 NmGotoMode(BusSleep)函数后节点请求睡眠并将睡眠状态位(在 OSEK/VDX NM 规范的 SDL 图中表示为 networkstatus. bussleep 位)设置为 1，即 networkstatus. bussleep=1，此时节点睡眠条件满足。

满足睡眠条件的节点会相继向总线上发送 Sleep. ind=1 的 Ring 报文，并将自身节点状态设置为常规运行预睡眠状态；不满足睡眠条件的节点则向总线上发送 Sleep. ind=0 的 Ring 报文。

网络中睡眠条件满足的各节点如果收到一条 Sleep. ind=1 的 Ring 报文后依然处于常规运行预睡眠状态，若收到 Sleep. ind=0 的 Ring 报文则恢复到常规运行状态。

直到网络中各节点都满足睡眠条件，也就是当网络中各节点都不间断地发送过一条 Sleep. ind=1 的 Ring 报文并处于常规运行预睡眠状态时，处于常规运行预睡眠状态下的某节点又向该网络中发送一条 Ring 报文，这是一条 Sleep. ack=1 的 Ring 报文，接收到该报文的各节点设置 Twbs 定时器并进入常规运行等待睡眠，当 Twbs 定时器到时后，各节点同步进入网络睡眠状态。常规运行状态到网络睡眠状态转换算法如图 4.41 所示。

(2) 常规运行状态下报文接收过程算法。网络中各节点的工作大多都是在常规运行状态下完成的。处于常规运行状态下的网络管理节点接收到一条网络管理报文时，首先要清 Nmrxcount 计数器(Nmrxcount 定时器是一个接收失效计数器用于记录节点接收失败的次数，这个计数器的门限值 rx _ limit 为 4，当 Nmrxcount 定时器的值等于 4 时，节点会进入跛行回家状态)，然后要判断接收报文的类型，若为 Limphome 报文则更新节点的配置信息并退出报文接收过程，若为 Alive 或者 Ring 报文则更新正常节点的配置信息，然后更

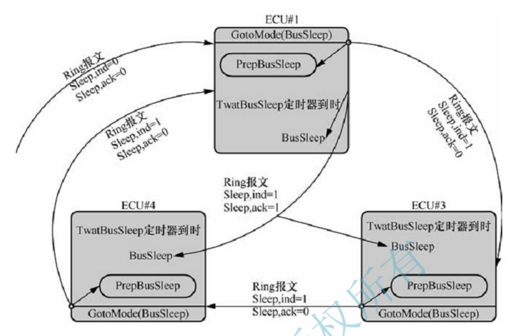


图 4.41 常规运行状态到网络睡眠状态转换算法图

新逻辑后继。然后再次判断报文类型，若为 Alive 报文则退出报文接收过程，若为 Ring 报文则需清除 Ttyp 定时器和 Tmax 定时器，之后判断该 Ring 报文是不是发给自己的，即判断报文的目标地址是否为自身节点地址，若判断结果为“是”则设置 Ttyp 定时器并退出报文接收过程，若判断结果为“否”则设定 Tmax 定时器并判断自身节点是否被跳过，若节点自身被跳过则向总线上发送一条 Alive 报文退出该报文接收过程，若没有被跳过则不做任何操作退出这一过程。常规运行状态下报文接收过程算法图如图 4.42 所示。

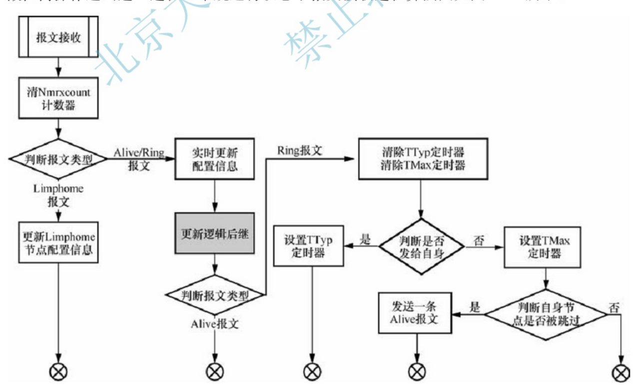


图 4.42 常规运行状态下报文接收过程算法

网络管理中逻辑环的建立是通过 Alive 报文和 Ring 报文实现的，其具体的实现方式就是在常规运行状态下接收 NM 报文，根据所接收报文的不同执行以下两个子过程，即更新逻辑后继与判断自身节点是否被跳过，这两个子过程是逻辑环建立的核心内容。

5. 软件代码移植

本文所描述的网络管理系统通过简单的修改就可以移植到 Freescale 公司出品的 32 位、16 位或 8 位芯片中，移植过程如下：

（1）将定义类型的头文件 Std _ Types. h 拷贝到工程的 Common 目录下；

（2）修改定义配置信息的头文件 OsekNm _ Cfg. h，该配置文件也可以用下文介绍的配置工具生成；

（3）完成 CAN 驱动相关设置，如设置网络管理报文相关的接收、发送通道，在 CAN 接收中断内按照网络管理模块定义的数据结构将 CAN 报文存储在 NM 模块的缓存中并执行报文接收的事件函数；

（4）在 20ms 的周期中断中调用 NM 定时器任务函数，用于实现软件定时器。

此处介绍内容在 Freescale32 位微控制器 MPC5554 开发板上进行开发，然后将程序移植在 FreescaleS12 系列 16 位微控制器以及 S08 系列 8 位微控制器上，都能够正常运行程序，实现相同的网络管理功能。

6. 配置工具设计

为实现网络管理一部分函数功能以及变量的可配置，书中设计开发了网络管理系统的上位机配置工具，用于生成包含所有配置信息的头文件 OsekNm _ Cfg. h，该工具可以方便软件开发人员测试程序，并极大地减轻了移植代码所需的工作量。

由于计算机硬件配置不断提高，以前 Java 语言与 C＋＋相比运算速度慢的劣势渐渐被用户忽略，而 Java 语言在内存管理、跨平台等方面的优势越来越明显地体现出来，所以本文所描述的配置工具选用 Java 语言进行开发。

Eclipse 不仅提供了一个优秀的 Java IDE（集成开发环境），而且还提供了一个能够代替 Java AWT 和 Swing 的 SWT 库。SWT 是 eclipse. org 提供的开发平台 Eclipse 中使用的一个窗口控件集和图形库，它集成于本机窗口系统，但有独立于操作系统窗口的 API。用 SWT 实现的应用程序具有优秀的感官效果及用户体验。

配置工具的开发首先要根据配置文件 OsekNm _ Cfg. h 中的内容来提取需要配置的信息，比如一些函数的宏开关，ENABLE 为使能、DISABLE 为禁止，使能的函数进行编译，禁止的函数就不进行编译；再比如一些变量的值，节点自身地址，Ttyp、Tmax、Terr、Twbs、Ttx 定时器的值都以宏定义的方式实现配置等。

4.7.7　网络管理系统的测试

1. 测试环境

网络仿真是评价通信性能的有效手段，目前流行的网络仿真系统主要分为两类：第一类是以 OPNET、QualNET 为代表的通用性网络仿真系统，系统完整支持 ISO 七层网络体系建模，并提供路由器、交换机等标准设备模型，一般用于互联网等大型网络系统仿真；另外一类就是以 CANoe 为代表的专用于 CAN 总线的仿真系统，其内核提供 CAN 物

理层和数据链路层协议的仿真机制，用户可在此基础上对上层协议进行建模与仿真。

这里采用德国 Vector 公司的网络仿真系统 CANoe 对电动汽车进行建模与仿真。在 CANoe7.1 下设计两个仿真节点，仿真节点均满足 OSEK 直接网络管理功能。将程序下载到 Freescale 公司 32 位单片机开发板中，并与两个仿真节点形成网络。CANoe 具有如下几个特点：

（1）针对性强。CANoe 仿真内核包含 CAN 物理层和数据链路层模型，支持 CAN2.0A/B 标准。

（2）可视化程度高。通过可视化界面对总线和通信节点进行配置，使用 CANdb＋＋数据库配置应用层协议，方便对协议中信息和信号进行管理。

（3）时间精度高。仿真时间精度为 0.25μs，可用于精度测量信息延时。

（4）统计量丰富。提供总线负载、峰值负载、信息帧数、信息帧收发时间、错误帧数等统计量。

（5）支持对节点的编程。提供 CAPL(Communication Access Programming Language) 语言对节点进行编程。CAPL 是面向事件的语言，支持系统事件、CAN 控制器事件、报文事件和定时器事件。

图 4.43 为 CANoe 下的电动汽车网络模型。

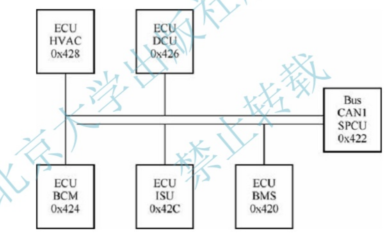


图 4.43 CANoe 下的电动汽车网络模型

图中电池组管理系统(BMS)和电机控制单元(ISU)为仿真节点，太阳能电池板控制单元(SPCU) 为真实节点，MPC5554 为开发平台。

2. 测试目标

测试目标如下。

（1）验证各种定时器时间是否满足设计要求。

（2）验证报文类型即 NMPDU 是否满足设计要求。

（3）验证单节点初始化及睡眠过程。

（4）验证节点是否可以从 NMLimphome 状态恢复。

（5）验证逻辑环的稳定运行。

（6）验证多节点的同步睡眠过程。

3. 测试结果

1) 单节点初始化及睡眠。

单节点是指网络中只存在一个节点，由于网络中无其他节点，所以该节点发送报文后必定会发生超时事件，多次超时事件发生后节点自动转换到跛行回家状态，并每隔 Terr 时间发送 Limphome 报文，单节点初始化及睡眠过程见表 4－7。

表 4－7　单节点初始化及睡眠过程

序号	时间	地址	方向	数据(十六进制)							
1	0.3731	0x422	Rx	22	01	00	00	00	00	00	00
2	0.4731	0x422	Rx	22	02	00	00	00	00	00	00
3	0.7231	0x422	Rx	22	01	00	00	00	00	00	00
4	0.8231	0x422	Rx	22	02	00	00	00	00	00	00
5	1.0731	0x422	Rx	22	01	00	00	00	00	00	00
6	1.1731	0x422	Rx	22	02	00	00	00	00	00	00
7	1.4231	0x422	Rx	22	01	00	00	00	00	00	00
8	1.5231	0x422	Rx	22	02	00	00	00	00	00	00
9	1.7731	0x422	Rx	22	01	00	00	00	00	00	00
10	2.7720	0x422	Rx	22	04	00	00	00	00	00	00
11	4.7719	0x422	Rx	22	04	00	00	00	00	00	00
12	5.7719	0x422	Rx	22	04	00	00	00	00	00	00
13	6.7719	0x422	Rx	22	14	00	00	00	00	00	00
14	8.5208	0x422	Rx	22	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF

当网络中只有一个节点时：

(1) 该节点先向总线上发送一条 Alive 报文(表 4－7 中的第 1 条记录)，并设定 Ttyp 定时器；

(2) 100ms 以后 Ttyp 定时器到时，该节点向网络中发送一条 Ring 报文(表 4－7 中第 2 条记录)，并设定 Tmax 定时器；

(3) 250ms 以后 Tmax 定时器到时，该节点重启并发送 Alive 报文(表 4－7 中第 3 条记录)，并且接收失败计数器加 1；

(4) 重复如上过程 3 次直到接收失败计数器累计值为 4 时(表 4－7 中第 9 条记录)，节点状态转换为跛行回家状态，并设定 Terr 定时器；

(5) Terr 定时器到时后向总线发送 Limphome 报文，连续发送 3 条 Limphome 报文(表 4－7 中第 10、11、12 条记录)；

(6) 随后上层应用程序调用 NmGotoMode(BusSleep)方法后，节点向总线发送一条 Sleep. ind 位置为 1 的 Limphome 报文(表 4－7 中第 13 条记录)，并设定 Tmax 定时器；

(7) Tmax 定时器到时后，节点转换到等待睡眠状态，并设定 Twbs 定时器，1500ms

以后，节点进入总线睡眠状态，为了可以清楚地看到状态转换，本文发送一条数据域为0x22FFFFFF的报文(表4－7中第14条记录)。

以上即为单节点初始化及睡眠状态转换的整个过程，表中数据都是通过CANoe软件实验得到。

2）逻辑环的建立及睡眠

表4－7中的节点如果不进入总线睡眠状态则会一直发送Limphome报文，此时，另外两个虚拟节点加入网络，这三个节点形成逻辑环通信并协调同步睡眠的过程见表4－8。

表4－8　逻辑环建立及睡眠过程

序号	时间	地址	方向	数据(十六进制)							
1	0.0013	0x422	Rx	22	04	00	00	00	00	00	00
2	0.0113	0x42C	Tx	2C	01	00	00	00	00	00	00
3	0.0214	0x422	Tx	22	01	00	00	00	00	00	00
4	0.0807	0x420	Rx	20	01	00	00	00	00	00	00
5	0.1815	0x42C	Tx	20	02	00	00	00	00	00	00
6	0.2825	0x420	Tx	22	02	00	00	00	00	00	00
7	0.3827	0x422	Rx	2C	02	00	00	00	00	00	00
8	0.4833	0x42C	Tx	20	02	00	00	00	00	00	00
9	0.5843	0x420	Tx	22	02	00	00	00	00	00	00
10	0.6837	0x422	Rx	2C	02	00	00	00	00	00	00
11	0.7844	0x42C	Tx	20	02	00	00	00	00	00	00
12	0.8855	0x420	Tx	22	02	00	00	00	00	00	00
13	0.9857	0x422	Rx	2C	02	00	00	00	00	00	00
14	1.0864	0x42C	Tx	20	02	00	00	00	00	00	00
15	1.1875	0x420	Tx	22	02	00	00	00	00	00	00
16	1.2877	0x422	Rx	2C	02	00	00	00	00	00	00
17	1.3884	0x42C	Tx	20	02	00	00	00	00	00	00
18	1.4895	0x420	Tx	22	02	00	00	00	00	00	00
19	1.5897	0x422	Rx	2C	02	00	00	00	00	00	00
20	1.6905	0x42C	Tx	20	12	00	00	00	00	00	00
21	1.7914	0x420	Tx	22	12	00	00	00	00	00	00
22	1.8916	0x422	Rx	2C	02	00	00	00	00	00	00
23	1.9924	0x42C	Tx	20	12	00	00	00	00	00	00
24	2.0934	0x420	Tx	22	12	00	00	00	00	00	00
25	2.1936	0x422	Rx	2C	02	00	00	00	00	00	00

(续表)

序号	时间	地址	方向	数据(十六进制)							
26	2.2945	0x42C	Tx	20	12	00	00	00	00	00	00
27	2.3955	0x420	Tx	22	12	00	00	00	00	00	00
28	2.4956	0x422	Rx	2C	02	00	00	00	00	00	00
29	2.5965	0x42C	Tx	20	12	00	00	00	00	00	00
30	2.6975	0x420	Tx	22	12	00	00	00	00	00	00
31	2.7976	0x422	Rx	2C	12	00	00	00	00	00	00
32	2.8984	0x42C	Tx	20	32	00	00	00	00	00	00
33	4.3292	0x422	Rx	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF	FF

当网络中有一个真实节点，两个CANoe虚拟节点时：

(1) 最初，网络只有一个地址为0x422的真实节点，此时节点处于跛行回家状态每隔Terr时间即1000ms发送一条Limphome报文(表4-8第1条记录)；

(2) 随后两个地址分别为0x420和0x42C的虚拟节点加入网络，此时三个节点相继重启，并发送各自的Alive报文(表4-8第2、3、4条记录)，随着各个节点NM模块更新逻辑后继，逻辑环便建立起来了；

(3) 表4-8的第5～19条记录都是逻辑环稳定运行的报文记录，此时节点相继发送Sleep.ind位为0的Ring报文；

(4) 接下来地址分别为0x420和0x42C的虚拟节点满足睡眠条件，发送Sleep.ind位置为1的Ring报文(表4-8第20、21条记录)，此时地址为0x422的真实节点睡眠条件不满足，继续发送Sleep.ind位等于0的Ring报文(表4-8第22条记录)，重复这一过程(表4-8第23～30条记录)直到地址为0x422的真实节点满足睡眠条件；

(5) 地址为0x422的真实节点满足睡眠条件时发送Sleep.ind位等于1的Ring报文(表4-8第31条记录)，收到该条Ring报文的0x42C节点发送一条Sleep.ack位等于1的Ring报文(表4-8第32条记录)；

(6) 收到Sleep.ack位等于1的Ring报文后，各节点在Twbs时间即1500ms以后进入总线睡眠状态，为了可以清楚地看到状态转换，本文发送一条数据域为0x22FFFFFF的报文(表4-8中第33条记录)。

如上两个过程可以表明：NM模块的协议数据单元、定时器和计数器均满足设计要求，节点能够实现状态转换，各节点能够组成逻辑环并进行实时可靠的通信。单个节点可进入跛行回家状态并实现到睡眠状态的转换，多节点可以协调同步睡眠。综上所述，该OSEK网络管理系统实现了基本的逻辑环通信以及通过状态转换协调同步睡眠，软件系统具有较高的可靠性，完全符合OSEK网络管理协议的定义。



1. 纯电动汽车由哪几部分组成?



2. 纯电动汽车有哪些布置形式？其特点是什么？
3. 在纯电动汽车设计中，如何确定电动机参数、传动系传动比和电池组容量？
4. 影响纯电动汽车续驶里程的主要因素有哪些？
5. 纯电动汽车中的电池管理系统有哪些功能？
6. 纯电动汽车能耗经济性评价指标有哪些？



第 5 章　增程式电动汽车

增程式电动汽车(Extended-Range Electric Vehicle，E-REV)，是以电能为主要驱动能源，发动机为辅助动力源的一种新型电动汽车。其动力系统主要由蓄电池和小型发电机组组成。在日常行驶时，E-REV 类似于纯电动汽车，发动机完全关闭，处于纯电动模式，该模式完全可以满足城市日常上下班行驶需求。而在蓄电池荷电状态(SOC)达到较低水平时，发动机起动作为主动力源，补充车辆行驶所需的电能，多余的电能对动力电池进行充电。

5.1　概　　述

5.1.1　增程式电动汽车结构

图 5.1 为一款增程式电动汽车动力传动系统结构图，其中粗线表示机械连接，细线表示电气连接，虚线为 CAN 总线连接。

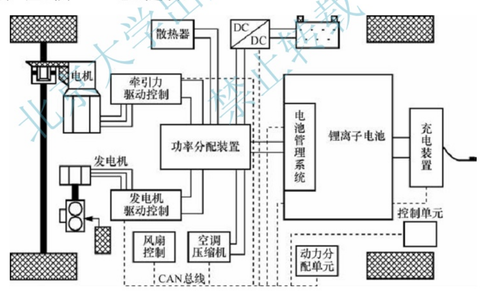


图 5.1　增程式电动汽车动力传动系统结构图

增程式电动汽车动力传动系统由电驱动系统、发动机/发电机系统、功率分配装置、动力电池等组成。

电驱动系统是由驱动电动机及牵引力驱动控制装置组成，发动机到驱动电动机之间没有机械连接，而是首先通过发电装置，将燃油的化学能转化成三相交流电，然后发电机驱动控制器将交流电流转化成直流电，并通过发电机驱动控制装置到达功率分配装置，根据工况需要做出牵引力驱动控制的功率分配。发动机作为主要动力源时的动力传输为：①在需求功率比较大的时候，功率分配装置会直接将电能传递给驱动力控制装置，驱动车辆行

驶，不经过电池管理系统。根据车辆功率需求，驱动力控制系统中的逆变器将直流电转化成三相交流电，驱动电动机运转。②在增程模式下，如果增程模块提供的电能有剩余，则多余的电能将为蓄电池充电，蓄电池在增程模式下起到平衡系统充电和放电的作用，稳定系统电压。③停车时，可以通过外接充电装置为蓄电池充电。此外，动力系统提供的电能要满足附件功率的需求，如散热器、风扇、空调压缩机等。

各个系统之间的数据传输可由 CAN 总线完成，实现控制单元之间的信息传递和命令执行，根据驾驶员施加给加速踏板或者制动踏板的位置指令，获取需求功率信息，传递给主控制器，主控制器根据目前行驶状况和车辆的状态进行判断，确定当前 E-REV 的运行模式，将控制指令传递给部件控制器，如牵引力驱动控制器、电池管理系统、发动机驱动控制器、附件功率控制等。

发动机、发电机和发电机驱动控制装置共同组成了一个增程器系统，增程器是增程式电动汽车驱动系统的关键组件，发动机/发电机系统与驱动车轮在机械上是分离的，发动机的转速和转矩与车速和牵引转矩的需求无关，因此可控制发动机运行在其转速-转矩平面上的任意点。通常应控制发动机使其运行在最佳工况区，此时发动机的油耗和排放降到最低程度，由于发动机和驱动车轮没有机械连接，因此最佳的发动机运行状态是可以实现的，其与电驱动系统的运行模式和控制策略密切相关。

增程器只提供电能，电能用来驱动电动机或者为动力电池充电，增加电动汽车的行驶里程，发动机到驱动电动机之间的动力传动路线没有机械连接，可以将电能用于驱动车辆，不经过蓄电池的充放电过程，降低了从增程系统到动力蓄电池的能量传递损失。增程式电动汽车的控制策略目的是在动力电池电能充足的情况下，保持在纯电动工作模式，将有害物质排放降到最低。这种模式下的控制策略与纯电动汽车类似，增程模式下的控制策略要保证增程器和动力电池得到最佳的匹配，获得最优的整车系统效率。

5.1.2 增程器的分类

增程器(Range Extender，RE)，是增程式电动汽车最重要的组件之一，它与车辆的性能、油耗、燃油替代、原始成本和运行成本密切相关，增程器可以按以下进行分类。

1. 按布置位置分类

增程器包括发电装置和辅助能量存储装置，根据增程器与汽车的安装关系，即增程器的安装位置可以分为挂车式、插拔式和车载式三种。

(1) 挂车式增程器。挂车式增程器安装在拖车上，根据行驶距离的不同来决定是否使用增程器，出行前需要对出行距离做出预估，长距离行驶时需要拖挂增程器适时提供能量；市区短途行驶时取下拖车，此时完全变为一辆纯电动汽车使用。这种形式由于其结构的特殊性，实用性不高，更多的是应用于室内场馆车。其优点是增程器输出功率能够根据需要设计，增程器可以使用多种辅助燃料。但是缺乏使用的灵活性，拖车质量和体积都比较大，不易倒车。在不确定是否需要长距离行驶时，或者有突发性事件的时候，都为驾乘者造成了很大的不便，限制了随意驾驶的自由度。

(2) 插拔式增程器。插拔式增程器将增程器设置为可插拔的模块，考虑到短途行驶时，不需要携带增程器行驶，提出了这种方案。这种增程器需要将增程器系统模块，包括控制器和 DC/DC 转换器集中在一起，做成一个方便拆卸的独立单元。在日常短途行驶时，

将增程器系统整体从车上拆下，此时只用蓄电池的电能驱动车辆行驶，完全变为纯电动汽车，减少了车辆的整备质量，提高了能量利用率；长途行驶时，将增程器模块通过机械及电气接口与整车动力系统相连，增加续驶里程。这种形式的增程器对设计要求较高，并需要与动力部件及传动系统的合理匹配，在匹配的基础上要求的控制策略非常复杂，还要解决振动噪声等附加问题，所以目前的增程式电动汽车价格偏高。

(3) 车载式增程器。车载式增程器与纯电动汽车的动力系统固定在一起，结构形式简单，动力系统可以方便地实现结构布置，提高了整车的空间利用率，与插拔式增程器相比，不需要在出行前对出行距离进行预估，也不需要频繁地对增程器进行拆卸和安装，是目前应用最多的增程器系统。

2. 按结构组成分类

按照增程器的结构组成将目前已有的增程器分为以下几种：

(1) 大容量蓄电池增程器。大容量蓄电池增程器的优点是便于统一标准和规格，研发周期短，成本低，容易实现量产。但是由于这种增程器基于传统的蓄电池，所以不可避免地存在能量密度较低、体积偏大、成本高等缺点。短距离行驶时的优势明显不足。

(2) 燃料电池增程器。为了达到尽量避免使用燃油、实现零排放的目标，燃料电池增程器成为一种新的选择。可以采用功率为 5~10kW 的小型燃料电池作为增程器，与车载主动力电池协同工作，延长电动汽车的续驶里程，燃料电池增程器的动力结构如图 5.2 所示。

以用氢燃料电池的增程器为例，把燃料电池增程器分为电源及其管理系统、氢气系统、燃料电池及其控制系统三个模块。其中电源及其管理系统子模块主要由压力传感器、电压传感器、电流传感器、DC/DC 转换器、继电器、控制器铝盒、控制器接插件集合而成。氢气系统子模块主要由氢瓶、氢传感器、氢气管路、减压阀集成。燃料电池及其控制系统子模块由电堆、电堆控制器、电池阀、单片检测接头、电堆输出端导线、燃料电池风扇 DC/DC 组成，可以很方便地实现拆装。采用模块化布置法的氢燃料电池增程器系统整体结构如图 5.3 所示。

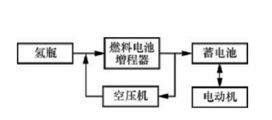


图 5.2 燃料电池增程器动力结构

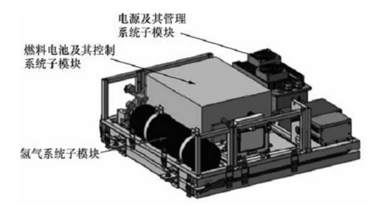


图 5.3 氢燃料电池增程器系统整体结构图

目前燃料电池增程器处于开发阶段，从整车集成方面的要求来讲，需要克服的技术问题比较多，要求空压机体积小、重量轻，并需要良好的散热装置。要求较大的压缩机空气压缩比，同时保证输出的空气流量相对较小，所以要使燃料电池增程器能够成熟地运用于增程式电动汽车，需要克服以上技术问题，目前在增程式电动汽车上的应用还处于研发阶段。

（3）发动机/发电机组增程器。发动机/发电机组增程器可以采用多种发动机与发电机进行组合成为增程式系统，可供选择的发动机有传统的活塞式发动机、转子发动机、小型燃气轮机等。由于这种增程系统的电能由发动机提供，经历了发动机/发电机的能量转换过程，因此发电机功率要大于增程系统功率，发动机到发电机之间存在能量损失，要求发动机功率大于发电机功率，在满足以上结构和配置的基础上，保证发动机和发电机都工作在转矩/转速高效率区内。发动机/发电机组的增程系统是目前应用最多和技术最成熟的增程系统。

5.1.3 增程式电动汽车原理

增程式电动汽车的动力系统在组成上与串联插电式混合动力汽车的动力系统相似。特殊之处在于增程式电动汽车的能量传递路线体现出两种动力系统，但是只有一种驱动方式，即电动机驱动，故不需要非常复杂的电能与化学能的耦合。在结构上，增程式电动汽车是在纯电动汽车的基础上开发的电动汽车，增程器的布置对原有车辆的动力系统结构影响较小。之所以称之为增程式电动汽车是因为车辆追加了增程器，而为车辆追加增程器的目的是进一步提升纯电动汽车的续驶里程，使其能够尽量避免频繁地停车充电。

第一种工作模式为纯电动模式，如图5.4所示的能量传递路线，与发动机和发电机无关，电池是唯一的动力源，这种工作模式与纯电动汽车一样，相当于一辆纯电动汽车。不同之处是，增程式的纯电动行驶里程可以设置的相对较小，不必装备大量的蓄电池组，电池的电量能够满足车辆起步、加速、爬坡、怠速，以及驱动汽车空调等附件。

第二种工作模式为增程模式，能量传递路线如图5.5所示。在电池的电达到预设的SOC最低值时，增程器系统启动，发动机运行在最佳的状况，使发电机发电，一部分用于驱动车辆行驶，多余的电量为蓄电池充电。增程模式的发动机可以有多种工作方式，根据控制策略的不同，可以选择发动机恒功率模式、功率跟随模式、恒功率与功率跟随模式结合，此外有智能控制策略和优化算法控制策略等复杂控制策略模式。当车辆停止时，可以利用市电为蓄电池充电。

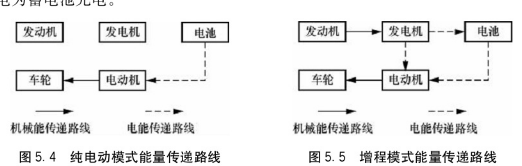
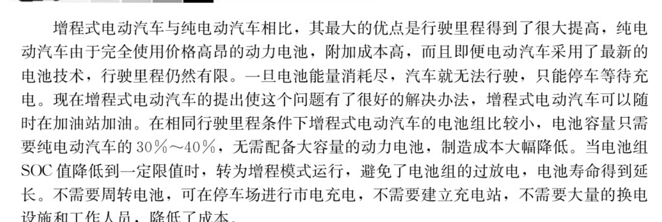


图5.4 纯电动模式能量传递路线　　图5.5 增程模式能量传递路线

5.1.4 增程式电动汽车的特点

增程式电动汽车与普通燃油驱动汽车相比，短距离行驶时不起动发动机，不排放污染物，长距离行驶时油耗比较低，在大部分情况下发动机不起动，所以噪声小。而且增程式电动汽车发动机/发电机起动时，工作于最佳工作范围内，这大大提高了发动机的工作效率。



增程式电动汽车与纯电动汽车相比，其最大的优点是行驶里程得到了很大提高，纯电动汽车由于完全使用价格高昂的动力电池，附加成本高，而且即便电动汽车采用了最新的电池技术，行驶里程仍然有限。一旦电池能量消耗尽，汽车就无法行驶，只能停车等待充电。现在增程式电动汽车的提出使这个问题有了很好的解决办法，增程式电动汽车可以随时在加油站加油。在相同行驶里程条件下增程式电动汽车的电池组比较小，电池容量只需要纯电动汽车的30%～40%，无需配备大容量的动力电池，制造成本大幅降低。当电池组SOC值降低到一定限值时，转为增程模式运行，避免了电池组的过放电，电池寿命得到延长。不需要周转电池，可在停车场进行市电充电，不需要建立充电站，不需要大量的换电设施和工作人员，降低了成本。

增程式电动汽车与插电式混合动力汽车最大的区别在于，由于动力电池容量的增大以及驱动系统设计的不同，增程式电动汽车在电能充足条件下行驶时发动机不参与工作。因此，这种类型的车辆并不需要像插电式混合动力汽车那样对其工作模式进行特定的说明。增程式电动汽车所使用的动力电池、驱动电机以及动力系统的用电功率都必须以满足整车性能要求为目的而设计，车辆所搭载的动力电池组及其容量也必须从能够满足纯电动汽车整车性能需要的角度考虑。增程式电动汽车的工作模式看上去与早期的纯电动型插电式混合动力汽车相似，然而在电池电量充足的情况下，增程式电动汽车必须在所有的工作模式下维持纯电驱动模式。增程式电动汽车不需要为了驾驶者速度和功率的需求而起动发动机，因此在电池电量充足的情况下不需要像早期的纯电动型插电式混合动力汽车那样转变成混合驱动模式运行。在增程器设计方面，增程式电动汽车允许将发动机的功率显著降低，发动机所提供的动力不需要达到车辆动力性能所需的峰值功率，仅满足车辆行驶所需要的持续动力需求即可。

增程式电动汽车与混合动力汽车相比，由于混合动力汽车采用了复杂的机械动力混合结构，发动机和电动机复合驱动，电池能量很小，只起到辅助驱动和制动能量回收的作用。增程式电动汽车采取电池扩容的方式解决了电池驱动的续行能力问题。虽然车辆成本略有提高，但是在正常的运行工况下，有了电能补充装置的作用，电池处于良性平台充放，保证了电池的使用寿命，减少了维护成本。而电能补充装置电量补充一直处于最佳工作状态，保证了发动机最佳工作状态。而且增程式电动汽车能外接充电，尽可能利用晚间低谷电或午间驾乘人员的休整间隙充电，进一步提高了能源利用率。

增程式电动汽车与燃料电池电动汽车相比，其电池成本更低，技术也更为成熟，燃料电池转换效率高，对环境无污染。随着燃料电池技术的进步和配套设施的成熟，开发和使用成本也会相应降低。

增程式电动汽车能够有效节约燃油利用率，这主要是因为：①由于发动机不是直接与机械系统相连，发动机的工作状态相对独立，可将发动机设定于最佳效率点工作；②在电量保持模式下，主要由发动机驱动整车行驶，当需求功率较小时，发动机关闭，由动力电池驱动整车行驶，当需求功率较大时，动力电池提供发动机功率不足的部分，这样可避免发动机的工作点波动，保证发动机工作于最佳效率点。③当车辆制动时，电池组能有效回收制动能量。

综上所述，增程式电动汽车是一种可增加续驶里程的纯电动汽车，兼有混合动力汽车和纯电动汽车的特征，是现阶段解决新能源汽车技术问题最切实可行的方案之一。增程式

纯电动汽车的特点如下：

（1）在电量消耗模式下，发动机不起动，由动力电池驱动整车行驶，这样可减少整车对石油的依赖，缓解石油危机。

（2）在电池电量不足时，为了保证车辆性能和电池组的安全性，进入电量保持模式，由动力电池和发动机联合驱动整车行驶。

（3）整车纯电动续驶里程满足大部分人员每天行驶里程要求，动力电池可利用晚间低谷电力充电，缓解供电压力。

（4）整车大部分情况下在电量消耗模式下行驶，能达到零排放和低噪声的效果。

（5）发动机与机械系统不直接相连，发动机可工作于最佳效率点，大大提高整车燃油效率。

鉴于增程器工作条件的特殊性，对电动汽车的增程系统提出了以下的要求：

（1）增程系统要稳定可靠，可以立刻启动并进入正常工作状态。当长时间不用的时候要定期开启发动机运转，以使得各个部件得到良好的润滑和维护。

（2）由于工况复杂，为了实现高效率和低排放的要求，要求系统处在最优工作点工作，因此控制器非常关键，通过控制策略和优化措施，在保证整车动力性前提下提高经济性和效率。

5.1.5 增程式电动汽车的主要技术指标

我国大规模商业化示范的增程式电动汽车的主要技术指标见表5-1。

表5-1 大规模商业化示范的增程式电动汽车的主要技术指标

指　标		增程式电动汽车	
动力电池	能量密度/(W·h/kg)	模块≥120	
	循环寿命/次	≥2000(100%DOD)	
	日历寿命/年	≥10	
	目标成本[元/(W·h)]	模块≤1.5	
车用电机	成本[元/W·h]	≤200	
	功率密度/(kW/kg)	≥2.7	
	最高效率/%	≥94	
电子控制	纯电动汽车电动化总成控制系统； 先进的纯电动汽车分布式控制系统； 纯电动汽车车载信息、智能充电和远程监控系统		
整车平台	最高车速/(km/h)	≥75(≤1100kg)	≥80～110
		≥100(≤1300kg)	
	纯电续驶里程/km	≥100	≥150(非快充类)
	附加成本	与同级别燃油车辆或基础车型相当(不包括储能系统)	

5.2 增程式电动汽车动力传动系统参数匹配

增程式电动汽车参数匹配的原则是根据整车动力总成的结构特点和整车设计指标(动力性、经济性、续驶里程等)，对整车动力总成的参数进行匹配。这里主要对驱动电动机的参数、动力电池的参数和增程器的参数进行匹配。

5.2.1 驱动电动机的参数匹配

增程式电动汽车对电力驱动系统的要求更加严格，因此选取的驱动电动机应该具备更高的功率密度，而且在较宽的转速和转矩范围内具备更好的效率特性，同时驱动电动机控制器能实现双向控制，以实现制动能量回收。

驱动电动机是增程式电动汽车行驶的动力源，增程式电动汽车要求驱动电动机在爬坡或低速行驶时提供较大的转矩，在加速时提供较大的功率，同时需要比较大的调速范围。其中电动机峰值转矩应满足整车爬坡度需求，在减速比、车轮半径等参数固定的情况下，电动机转矩决定爬坡性能。

驱动电动机的转矩(功率)-转速特性如图 5.6 所示。

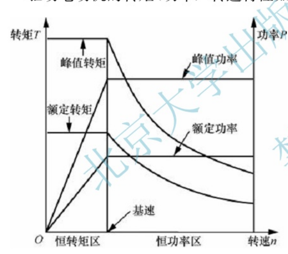


图 5.6 驱动电动机的转矩(功率)-转速特性

需要确定的特性参数主要包括电动机的最高转速和额定转速、峰值功率和额定功率等。

1. 最高转速和额定转速

电动汽车最高行驶车速与电动机最高转速之间的关系为

$$n_{max} = \frac{u_{max} i_0}{0.377r} \qquad (5-1)$$

式中，n_{max} 为电动机的最高转速(r/min)；u_{max} 为电动汽车的最高行驶车速(km/h)；i_0 为主减速器传动比；r 为车轮半径(m)。

电动机的最高转速与额定转速之比称为扩大恒功率区系数，一般用 β 来表示。β 值越大，转速越低，转矩增高，有利于提高车辆的加速和爬坡性能，稳定运行性能越好，但同时功率变换器尺寸也会增大，因此 β 值不宜过高，β 通常取值为 2～4。

2. 功率匹配

驱动电动机的功率直接影响整车的动力性，电动机功率越大，整车运行时的后备功率也越大，加速以及爬坡能力越强，但同时也会增加电动机本身的体积和质量，进而影响整车的质量。驱动电动机的额定功率一般由最高车速确定，峰值功率由整车的设计目标来确定，峰值功率应该达到最高车速、加速时间以及爬坡性能分别对应的最大功率需求。

(1) 根据最高车速确定电动机功率。最高车速对应的电动机功率需求为平坦路面满载运行时所需的电动机功率，其表达式为

$$P_{m1}=\frac{u_{max}}{3600\eta_t}\left(mgf+\frac{C_DAu_{max}^2}{21.15}\right) \tag{5-2}$$

式中，P_{m1} 为最高车速所需的电动机功率；m 为汽车质量；η_t 为传动系统效率；f 为滚动阻力系数；C_D 为风阻系数；A 为迎风面积。

(2) 根据最大爬坡度确定电动机功率。最大爬坡度所需的电动机功率的表达式为

$$P_{m2}=\frac{u_p}{3600\eta_t}\left(mgf\cos\alpha_{max}+mg\sin\alpha_{max}+\frac{C_DAu_p^2}{21.15}\right) \tag{5-3}$$

式中，P_{m2} 为最大爬坡度所需的电动机功率；α_{max} 为最大坡度角；u_p 为爬坡时的车速，可以取 30km/h。

(3) 根据加速时间确定电动机功率。加速时间所需的电动机功率完全由车辆的加速性能、电动机特性和传输特性来确定

$$P_{m3}=\frac{1}{1000\eta_t}\left[\frac{2}{3}mgfu_f+\frac{1}{5}\rho_aC_DAu_f^3+\frac{\delta m}{2t_a}(u_f^2+u_b^2)\right] \tag{5-4}$$

式中，P_{m3} 为加速时间所需的电动机功率；u_f 为加速结束后的最终车速(m/s)；u_b 为驱动电动机额定转速对应的车速(m/s)；t_a 为预期的加速时间(s)；δ 为旋转质量转换系数。

式(5-4)中括号内的第一、二项分别代表克服轮胎的滚动阻力和空气阻力的平均功率，第三项功率代表用来加速车辆质量的能力。

综合考虑动力性各项指标，电动机的额定功率和峰值功率为

$$P_e\geqslant P_{m1}$$

$$P_{e\,max}\geqslant \max[P_{m1}\quad P_{m2}\quad P_{m3}]$$

电动机的峰值功率与额定功率的关系为

$$P_{e\,max}=\lambda P_e \tag{5-5}$$

式中，$P_{e\,max}$ 为电动机的峰值功率；P_e 为电动机的额定功率；λ 为电动机的过载系数。

电动机的额定转矩和峰值转矩为

$$T_e=\frac{P_e\times 9550}{n_e} \tag{5-6}$$

$$T_{e\,max}=\frac{P_{e\,max}\times 9550}{n_e} \tag{5-7}$$

式中，$T_{e\,max}$ 为电动机的峰值转矩；T_e 为电动机的额定转矩；n_e 为电动机的额定转速。

驱动电动机参数初步确定之后，还须验证是否满足一定车速下的最大爬坡度和汽车行驶最高车速的要求，即

$$\frac{mg}{T_{e\,max}\eta_t}\left(f\cos\alpha_{max}+\sin\alpha_{max}+\frac{C_DAu_p^2}{21.15mg}\right)\leqslant\frac{i_0}{r}\leqslant\frac{0.377n_{max}}{u_{max}} \tag{5-8}$$

5.2.2 蓄电池参数的匹配

电动汽车用蓄电池是整车的主要能量源，电池的参数匹配包括电池类型的选择、电池组电压、单体电池的个数和能量的匹配。增程式电动汽车由于其增程系统的特殊性，要求电池的电压等级要与电动机电压等级相一致，且符合电动机电压变化的要求。

1. 能量需求

能量方面，要求电池在现有技术条件下，具有较高的比能量和比功率，以及充放电循

环使用寿命、良好的安全性和稳定性。

蓄电池能量为

$$E_B = \frac{U_m C_E}{1000} \tag{5-9}$$

式中，E_B 为蓄电池能量(kW·h)；U_m 为蓄电池端电压(V)；C_E 为蓄电池容量(A·h)。

蓄电池能量应满足以下条件

$$E_B \geqslant \frac{mgf + C_D A u_a^2/21.15}{3600 \times DOD \eta_t \eta_{mc} \eta_{dis}(1-\eta_a)} \times S_1 \tag{5-10}$$

式中，η_{mc} 为电动机效率；η_{dis} 为蓄电池放电效率；η_a 为汽车附件能量消耗比例系数；S_1 为纯电动行驶里程(km)；DOD 为蓄电池放电深度。

或者蓄电池容量满足以下条件

$$C_E \geqslant \frac{mgf + C_D A u_a^2/21.15}{3.6 \times DOD \eta_t \eta_{mc} \eta_{dis}(1-\eta_a) U_m} \times S_1 \tag{5-11}$$

2. 功率要求

蓄电池最大放电功率需满足

$$P_{bat_max} \geqslant \frac{P_{max}}{\eta_{mc}} + P_A \tag{5-12}$$

式中，P_{bat_max} 为蓄电池最大放电功率(kW)；P_A 为车辆附件功率。

或者满足容量要求

$$C_P \geqslant \frac{1000}{kU_m}\left(\frac{P_{bat_max}}{\eta_{mc}} + P_A\right) \tag{5-13}$$

式中，k 为电池最大放电率。

蓄电池容量取值规则为

$$C = \min_{k^* = \min(k)} \{\max[C_P(k) \quad C_E(k)]\} \tag{5-14}$$

式中，k^* 为电池最大放电率。

5.2.3 增程器的参数匹配

增程器采用车载式，与纯电动汽车的动力系统固定在一起，这样的系统结构形式简单，系统作用是为驱动电动机提供冗余功率，在蓄电池 SOC 值低于设定值时或蓄电池出故障时，应能保证车辆以平均行驶车速匀速行驶，在增程模式下，发动机提供源动力，要求具有相当的动力性，故需要匹配发动机/发电机的参数。

发动机功率的选择对增程式电动汽车动力系统的设计至关重要。发动机选型设计中常按照汽车的最高车速来初步选择发动机功率，这是因为汽车的加速性能和爬坡性能可以由汽车的最高车速来体现，即满足下式：

$$P_{RE} = \frac{1}{3600\eta_t}\left(mgfu_{max} + \frac{C_D A u_{max}^3}{21.15}\right) \tag{5-15}$$

发动机额定功率的选择应大于上述计算的理论值，以承载连续的非牵引负载，如灯光、娱乐、空调、动力转向装置和制动增压等。

根据所选发动机的燃油消耗 Map 图，可以计算满足 E-REV 增程续驶里程所需要的油箱容积为

$$V=\frac{S_2 f_c}{u_a} \tag{5-16}$$

式中，S_2 为增程续驶里程(km)；f_c 为发动机高效工作点处油耗(L/h)。

永磁同步电动机的转子为永磁体，效率高，功率密度大，一般发电机选择永磁同步电动机。

发电机的工作电压应与电池组相匹配，发电机的功率应与发动机功率的选择相协调匹配。要求所选的发动机在发电机工作转速时具有较低的燃油消耗率和较好的排放性能。

5.2.4 设计实例

增程式电动汽车动力系统的参数设计和系统零部件之间参数的匹配是按照设计初期的目标来完成的。某纯电动汽车整备质量为1430kg，满载质量为1700kg，空气阻力系数为0.29，主减速比为6.058，滚动阻力系数为0.015，滚动半径为0.334m，迎风面积为1.97m^2，传动系效率为0.95。

增程式电动汽车的设计目标为：

(1) 最高车速为120km/h；

(2) 0～100km/h加速时间为14s；

(3) 最大爬坡度为30%；

(4) 纯电动行驶里程：城市工况大于60km；90km/h续航里程大于60km；

(5) 总续驶里程不小于300km。

据统计，国内55%的用户的平均日行驶里程不超过42km，将增程式电动汽车的纯电动模式下的行驶里程的设计目标定为60km。将有大于67%的用户日常出行中仅靠纯电动模式就可以满足每天的行驶需求，对于日行驶里程大于60km的用户，也能节省大部分的油耗，仅有超出60km的行驶里程以增程模式行驶。

根据式(5-1)～式(5—14)就可以对增程式电动汽车动力传动系统参数进行匹配，计算结果如下。

1. 驱动电动机参数

驱动电动机类型选择永磁同步电动机，峰值功率为103kW，额定功率为42kW，最高转速为7000r/min，额定转速为3000r/min，峰值转矩为328Nm，额定转矩为134Nm。

2. 蓄电池参数

蓄电池类型选择磷酸铁锂电池，单体个数为90，额定电压为288V，容量为63A·h，SOC使用范围为30%～100%，最大放电率为5C，最大充电率为3C。

3. 增程器参数

发动机选择直列四缸汽油发动机，功率为43kW，转速为4000r/min，排量为1.3L。

满足E-REV增程续驶里程所需的油箱容积为14L。

发电机选择永磁同步电动机，标定输出功率为32kW，标定工作转速为4000r/min，额定电压为288V。

5.2.5 动力传动系统参数优化方法

如果对动力传动系统的参数匹配不满意，可以对其进行优化。这里基于遗传算法选取

易于控制且对整车动力性能和经济性能具有显著影响的参数进行优化设计。

对于只有一格主减速比的增程式电动汽车来说，影响整车动力性和经济性的动力传动系统参数主要有发动机功率、驱动电动机功率、电池数量、蓄电池充放电 SOC 最高值和最低值。

1. 约束条件

为了锁定搜索范围，对动力性中的加速性和爬坡性进行约束处理，一般情况下，若汽车的加速性和爬坡性满足设计要求，其最高车速也能满足设计要求，所以，只对爬坡度和加速度时间进行分析。

汽车爬坡角为

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{F_t - F_f}{mg\sqrt{1+f^2}}\right) - \arctan f \tag{5-17}$$

式中，F_t 为驱动力；F_f 为滚动阻力；f 为滚动阻力系数。

设汽车在水平良好路面上加速行驶，电动汽车所受到的坡度阻力为零，则有

$$\frac{du}{dt} = \frac{F_t - (F_f + F_w)}{\delta m} \tag{5-18}$$

将式(5-18)两边作积分变换推导出电动汽车的加速时间为

$$T = \int_{u_0}^{u_a} \frac{\delta m}{F_t - (F_f + F_w)} du \tag{5-19}$$

根据式(5-17)和式(5-18)，得出动力性约束为

$$g_1 = -\arcsin\left(\frac{F_t - F_f}{mg\sqrt{1+f^2}}\right) - \arctan f + \arctan i_{max} \leqslant 0 \tag{5-20}$$

$$g_2 = \int_0^{100} \frac{\delta m}{F_t - (F_f + F_w)} du - t \leqslant 0 \tag{5-21}$$

式中，t 为电动汽车 0～100km/h 的加速时间(s)。

2. 优化目标

以增程式电动汽车总的耗电百分比和燃油消耗之和为目标函数，两者之和越小，表明车辆续驶里程越大，性能越好。

整车能量损耗为

$$W_{ci} = \frac{1000 P_i t_i}{\eta} \tag{5-22}$$

$$P_i = \frac{u_i}{3600}\left(mgf + mgi + \frac{C_D A}{21.15}u_i^2 + \delta m \frac{du}{dt}\right) \tag{5-23}$$

式中，u_i 为车辆在每个状态的行驶速度；P_i 为车辆在每个状态消耗的功率；t_i 为车辆在每个状态行驶的时间；η 为车辆总的传动效率。

蓄电池存储的总能量为

$$W = C_e U_e N \eta_{DOD} \tag{5-24}$$

式中，C_e 为单个蓄电池的容量；U_e 为单个蓄电池的电压；N 为单体电池数目；η_{DOD} 为蓄电池的放电深度。

遗传算法的目标函数为

$$P_{er} = \frac{\sum W_{ci}}{W} \tag{5-25}$$

增程模式行驶时，驱动力由发动机提供，因此，根据万有特性曲线的发动机最优工作曲线，可以计算发动机在一定功率时的最低燃油消耗率，从而计算出该车速对应的瞬时单位时间内的燃油消耗量，即

$$Q_t = \frac{P_e b}{367.1\rho g} \tag{5-26}$$

式中，Q_t 为发动机单位时间内的燃油消耗量(mL/s)；P_e 为发动机功率(kW)；b 为发动机燃油消耗率(g/(kW·h))；ρ 为燃油的密度(kg/L)。

等效折算成百公里燃油消耗量(L/100km)为

$$Q_s = \frac{P_e b}{1.02u_a\rho g} \tag{5-27}$$

将多目标优化问题，通过加权法简化为单一目标，优化目标为

$$\min f(x) = a_1 P_{er} + a_2 Q_s \tag{5-28}$$

式中，x 为包含了增程式电动汽车动力传动系统参数的向量；a_1 、a_2 分别为耗电百分比和燃油消耗量的加权系数。

利用 MatLab 遗传算法工具箱，在编程器中编写遗传算法的适应度函数，将编辑好的适应度函数导入 GUI 界面，并进行初始值的设置，就可以对设计变量进行优化。

5.3 增程式电动汽车控制策略

增程式电动汽车各动力部件的参数在满足整车动力性前提下，整个动力传动系统中机械部件和电气部件的协调工作是影响整车经济性的一个关键因素。为使整个动力传动系统中机械部件和电气部件协调工作以及满足增程式电动汽车在不同工作模式下的切换，制定一个简洁高效的控制策略是非常重要的。

基于增程式电动汽车的结构，将增程式电动汽车的工作模式分为纯电动工作模式和增程工作模式，两种工作模式的切换采用了基于逻辑门限值的控制策略。增程模式下采用将恒功率和功率跟随控制策略结合起来的控制方法，在不同的工作模式下能分别体现出两种控制方式的优点。将增程模式工作区域划分为 6 种工作状态，与纯电动模式和制动能量回收工作模式一起构成 8 种工作模式。

5.3.1 增程式电动汽车控制策略概述

增程式电动汽车的控制策略是服务于车辆控制器的一种算法，车辆控制器接收来自于驾驶员的指令，并采集当前车辆行驶工况信息，以当前车辆状态作为反馈条件，如电池 SOC 值，并根据预设的算法指令，确定发动机/发电机组和动力电池的能量分配关系，从而通过控制器来决定车辆的运行状态。

基于增程式电动汽车的特殊运行模式，在纯电动模式下仅靠电池的能量驱动车辆行驶，增程模式下首先由发动机/发电机组为驱动电动机提供驱动电能，多余的电量为电池充电，因此增程模式下能量管理控制策略的好坏不仅直接影响整车的动力性和经济性，也

对新车型的设计研发具有直接的影响。增程模式下的控制策略主要有以下几种：发动机恒功率模式控制策略、发动机功率跟随模式控制策略、将恒功率模式与功率跟随模式结合起来的控制策略、优化算法控制策略和智能控制策略等。

1. 恒功率控制策略

恒功率控制策略又称为单点控制策略，增程器启动后，发动机在预设的工作点按恒定功率输出，输出功率不随工况的变化而变化，该工作点可以是最佳功率点，也可以是保证动力性前提下的最低油耗点，工作点的选取应兼顾发动机的燃油消耗、功率及转速。该控制策略下发动机的输出功率优先用来驱动车轮行驶，当车辆驱动需求功率较小时，剩余的发动机输出功率将用来为蓄电池充电。此外，为了在电池 SOC 值最低的情况下也能提供足够的电能，满足各种行驶工况的需要，就要求发动机能够在较高的转速下工作，发动机恒功率运行的工作过程应持续到使蓄电池组充电的 SOC 值达到最大，之后再关闭增程器或使发动机怠速运行。

恒功率控制策略的优点是发动机可以工作在低油耗或者高效率区，可以提高整车的燃油经济性，缺点在于蓄电池放电电流会随着工况的频繁变化而产生较大波动，使蓄电池经常处于深度充放电循环状态，因此这种控制模式虽然控制策略简单，但采用这种控制策略，会降低蓄电池的使用寿命。

2. 功率跟随控制策略

功率跟随控制策略分为发动机在三个功率点运行的三点功率跟随控制策略和发动机沿固定曲线段运行的曲线功率跟随控制策略。

三点功率跟随控制策略，预先选定三个最优工作区域的发动机功率值，可以根据不同的工况环境及驾驶员驾驶意图来确定相应的工作点，这样发动机的工作点增加，与恒功率控制策略相比，有两个优点：第一，大部分的发动机功率可以经过动力传递路线，传给驱动电机，驱动汽车行驶，降低了能量由化学能—电能—化学能—电能的多级转换，降低了电动机功率损失，提高了整车的效率；第二，蓄电池的充放电波动小，有效地避免了蓄电池过放电，提高了蓄电池的寿命和使用稳定性。

曲线功率跟随控制策略，即发动机的运行沿着固定曲线变化，可以连续地改变发动机的功率值，一般选择最佳燃油经济性时的发动机功率曲线为目标跟随曲线。该控制策略是由车辆行驶工况决定的，发动机的特性已知，车辆在某一个时刻工况下的需求功率，决定了在这一功率下的最低燃油消耗率点的数值。因此当蓄电池的 SOC 值达到最低限制时，发动机/发电机组开启，并沿着最低燃油消耗率曲线运行，这种控制模式下，发动机能够提供给蓄电池充电的功率很少，降低了化学能和电能之间的二级转化，极大地提高了动力性和燃油经济性。但是这种控制方法的发动机的工作区间变大，怠速的时候发动机能量利用率低。

3. 瞬时优化控制策略

瞬时优化控制策略多用于混合动力汽车中以消耗燃油为主的动力系统，燃油消耗是电池电能间接消耗燃油与发动机直接消耗燃油之和，在计算时将动力电池消耗的电能等效成燃油消耗量。可以有效地结合燃油消耗和排放，对电能和燃油消耗做出一个准确的评估，同时通过计算过程可以看出这种优化方法的计算量大，在计算等效燃油消耗时准确性低，

且系统复杂，成本高。

4. 自适应控制策略

自适应控制策略的目标是将整车的燃油消耗和排放两种不同的量纲进行统一，定义权重系数的大小，来突出降低整车的燃油消耗和降低排放两种控制目标。控制的因子为加速时间，百公里油耗，HC、CO、PM以及NO化合物，根据车辆的行驶工况环境来确定各因子的权值。

这种控制策略的优点是驾驶员灵活性较好，驾驶员可以根据环境或者自己的意愿来调整自己的驾驶目标，由于该策略同时将动力性和经济性作为影响因子，综合考虑了发动机/电动机的最佳工作点，故在这种控制策略下，车辆的综合性能较好。但这种控制策略没有考虑电动机驱动的影响，所以在应用这种控制策略前，首先要将电动机的电量消耗等效折算成燃油消耗量和排放量。

5. 模糊控制策略

模糊控制策略的工程化较强，该控制策略以发动机最高效率区域和最低燃油消耗为目标，由模糊控制器和处理器组成，模糊逻辑控制器驱动发动机工作。控制器又由模糊化接口、反模糊化接口、模糊推理、知识库四部分组成。

模糊逻辑控制策略的优点是不需要建立明确的数学模型，而是通过实验数据来进行分析和处理，将采集到的信号数据做模糊化处理，作为模糊计算的输入数据，根据预设的推理方法和知识规则，得出模糊结论。缺点是要有大量的工程实验数据作为模糊计算的参考依据，此外，基于实验得到的数据处理模糊算法规则非常有限，不同配置的汽车发动机，规则的建立非常困难，处于技术不成熟阶段，不能制订有效的、复杂的、系统的控制策略。

5.3.2 增程式电动汽车控制策略设计

通过对各种控制策略的分析，得出恒功率模式具有较高的工作效率，而功率跟随模式具有更好的燃油经济性和动力性，因此在不同的车辆运行模式下，分别选择更加适合当前功率的控制策略，两者之间进行切换，会使两种控制策略的优势得以充分发挥。

增程模式下的控制策略是将恒功率定点控制策略和最佳燃油消耗曲线的功率跟随控制策略结合起来使用，充分利用增程器和蓄电池的相对高效工作区域，当车辆行驶需求功率高于一定值的时候，采用功率跟随模式的控制策略，避免蓄电池的频繁启停和过放电；当车辆行驶需求功率较小时，则根据SOC值划分出不同的工作模式。

设定SOC门限值作为纯电动模式和增程模式的切换点。当汽车运行在增程模式下时，发动机/电动机为蓄电池充电，使电池SOC值升高，在未达到SOC最高值时，不会启用纯电动运行模式，而是将多余的电量存储在蓄电池中，直到SOC值达到最高限值后，发动机将再次关闭，汽车再次进入纯电动运行模式。增程式电动汽车的总体运行模式如图5.7所示，图中纵坐标分别为蓄电池的

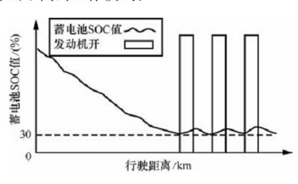


图5.7 增程式电动汽车运行模式

SOC 值和发动机开启或者关闭的状态。

1. 增程式电动汽车控制策略要求

增程式电动汽车主要利用电能为驱动能源，增加一个发动机/发电机组作为增程器，在蓄电池的 SOC 值达到最低限值的时候，启动增程器，在最佳的状况下工作，多余的电能用来为蓄电池充电，具有低排放甚至零排放，当车辆运行在日常的城市上下班道路时，几乎不需要起动发动机，电能足够满足驾驶者的出行需求。因此，增程式电动汽车的控制策略可以分为两部分，一部分与纯电动汽车一样为纯电动行驶时候的控制策略；另一部分是增程模式下的控制策略，此时的控制策略要最大限度地降低能量转化带来的能量损耗，在保证动力性的前提下，达到燃油经济性最佳的目标，提高能量利用率，同时兼顾蓄电池的充放电和循环使用寿命，提高整车的工作效率。

为了使两种能源得到最佳的组合和协调运行，应在保证动力性和驾驶性的基础上，使燃油经济性最好以及排放最低，故应采用合适的能源管理控制策略。在汽车行驶过程中，工况是多变和不可预测的，因此控制策略应可以根据不同的路况以及车辆的运行需求，适时合理地分配其能量流及做出合理的反应。对增程式电动汽车控制策略的要求如下：

(1) 纯电动模式和增程模式的切换控制要合理，充分利用蓄电池驱动，实现零排放。

(2) 防止对蓄电池的过充电和过放电，避免频繁的充放电，延长蓄电池的使用寿命。

(3) 在启动增程模式下运行后，发动机的启停控制要合理。当发动机为蓄电池充电电量达到一定值的时候，才可关闭发动机/发电机组，继续用电能驱动，这样能量多级转化的损失非常大。但是如果发动机起动后提供给蓄电池的电量比较小，就切换到纯电动运行模式，则需要频繁地起动发动机，必然对发动机的寿命受到影响，也不利于降低排放的设计要求。

(4) 发动机长期不用的时候，要设置蓄电池 SOC 值最低的时候也能运行的特殊控制模式，以使长期不用的发动机/发电机组得到维护保养。

2. 纯电驱动模式控制策略

增程式电动汽车运行按照蓄电池的状态(Energy Storage System，ESS)分为两种模式，一种是电量消耗(Charge Depleting，CD)状态，另一种是电量保持(Charge Sustain，CS)状态，如图 5.8 所示，最初运行时，电池系统 SOC 处于最高值状态，车辆运行过程中，电池是唯一动力源，驱动电动机的功率也完全是由蓄电池提供的，故该状态又称为纯电动运行模式，因为电池的 SOC 值不断降低，而发动机/发电机组又完全关闭，故将最大 SOC 值定为 0.9，防止过充电对电池造成的损害。当电池的 SOC 降低到最低限值的时候，发动机/发电机组开始工作，此时切换到电量保持 CS 阶段，此阶段的 SOC 并不是一个固定的值，而是在某一个 SOC 范围内。

为了有效防止对蓄电池过充电和过放电，应设置蓄电池 SOC 的最高值和最低值。

CD 模式代表蓄电池电能耗尽后的增程运行模式，该模式下发动机/发电机组产生的能量若有剩余，则会为蓄电池提供电量，使蓄电池处于充电状态，故在 CD 模式下蓄电池的 SOC 是一个变化值，考虑到应防止蓄电池频繁充放电，所以该模式下的转换判断图应是单

向起作用。如图 5.8 所示，在 CD 模式下，发动机/发电机组为蓄电池充电 SOC 值达到最高值时，发动机关闭，转为纯电动行驶，此时仍为 CD 模式，而一旦 SOC 值小于最低值，系统进入 CS 模式后，控制系统则不应回到 CD 模式下。在 CD 模式下，当需求功率小于等于 0 时，设置为制动能量回收模式，将一部分能量再回馈给蓄电池，CD 模式下的驱动力分配如图 5.9 所示，横坐标以上是指蓄电池为车辆提供行驶动力，横坐标以下区域为制动时的制动能量回收模式。

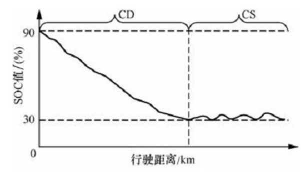


图 5.8 E-REV 汽车两种模式转换图

图 5.9 CD 模式下的驱动功率分配图

3. 增程模式控制策略

汽车在纯电动模式下运行，动力电池的 SOC 值降低到最低值时，增程模块会开启，进入增程模式运行，在功率跟随模式下，发动机工作在最低燃油消耗率区域。此时包括两条能量传递路线，一条为发动机—发电机—传动系—电动机；另一条路线是经过蓄电池环节的能量传递，路线为发动机—发电机—蓄电池—电动机。为了比较两条能量传递路线的动力性和经济性，设在传动系统的最末端驱动电动机的需求功率都为 P_{req}，发动机的输入功率分别设为 P_{e1} 和 P_{e2}，按照第一条路径，需求功率经过发电机的转化后传递给驱动电动机，经过这样的能量转化后的发动机能量利用率较高，发动机输入功率为

$$P_{e1}=\frac{P_{req}}{\eta_{mc}\eta_{g}} \tag{5-29}$$

式中，η_{g} 为发动机到发电机的效率。

第二条能量传递路径是在发动机作为动力源且有剩余功率时，剩余的能量转化成电能存储在蓄电池中，这种情况下发动机/发电机组提供的电能非常充足，也就是说发动机所提供的功率可以满足所有工况需求，当车辆行驶所需的功率或者扭矩较小时，发动机富余能量提供给蓄电池，此时的发动机输入功率为

$$P_{e2}=\frac{P_{req}}{\eta_{mc}\eta_{g}\eta_{dis}\eta_{ch}} \tag{5-30}$$

式中，η_{ch} 为蓄电池的充电效率；η_{dis} 为蓄电池的放电效率。

可以看出，在发动机的输出功率一定的情况下，第一条能量传递路线的经济性更好。由于蓄电池的充放电效率相对较低，所以第二种能量传递路线的能量损失较大。但从整车运行工况来看，如果只采用第一种能量传递路线，所对应的发动机运行状态与传统发动机一样，能量利用率非常低。所以应根据不同的工况分析这两条不同的能量传递路线。

电池放电效率与电池的放电功率和电池内部存储的功率有关，根据发动机的万有特性曲线，标记出发动机燃油经济性的最优工作区，并计算蓄电池的充电效率和放电效率，电

池放电效率为

$$n_{dis} = \frac{P_{dis}}{P_{store}} \tag{5-31}$$

式中，P_{dis} 为放电功率；P_{store} 为电池内部存储功率。

放电功率为

$$P_{dis} = \frac{P_{req}}{\eta_t \eta_{mc}} \tag{5-32}$$

式中，P_{req} 为汽车需求功率。

电池充电效率为

$$\eta_{ch} = \frac{P_{store}}{P_{ch}} = \frac{P_{dis} + I_{dis}^2 R_{dis}}{P_{store} + I_{ch}^2 R_{ch}} \tag{5-33}$$

式中，P_{ch} 为充电功率；I_{dis} 为放电电流；I_{ch} 为充电电流；R_{dis} 为放电内阻；R_{ch} 为充电内阻。

放电电流为

$$I_{dis} = \frac{P_{dis}}{U_{dis}} \tag{5-34}$$

式中，U_{dis} 为放电电压。

充电电流为

$$I_{ch} = \frac{P_{store}}{U_{ch}} \tag{5-35}$$

式中，U_{ch} 为充电电压。

电动机转速为

$$n_m(t) = \frac{1000Vk(t)}{2\pi \cdot 60r} \tag{5-36}$$

式中，$k(t)$ 为车辆的传动比。

电动机转矩为

$$T_m(t) = \frac{9550P_{req}}{n_m(t)} \tag{5-37}$$

由于在CS模式下的蓄电池SOC值变化不大，所以工况的不同对U_{dis}、U_{ch}和R_{dis}、R_{ch}等参数数值的变化影响很小，为了计算简便，将这四个参数看作常量。

通过以上的计算公式，结合匹配得到的部件参数，得出两种能量传递路线的发动机临界值为5.4kW。发动机高效区域在2000～4000r/min，发动机的最优工作区域为16.7～41.8kW。

蓄电池在SOC值为0.33～0.8时是高效放电区，所以将该区域设定为工作区，为了减少电池的充放电损失，提高能量转换效率，蓄电池SOC的工作区间应该在其充放电时内阻相对较低的区域。另外使电池电量保持在中间SOC值范围内，能有效延长电池寿命。为了保证车辆运行时电池能够随时高效地输出和接收电能以及保证电池的安全性，能量管理策略需要维持蓄电池SOC的平衡，电池的SOC工作范围与需要主动充电的SOC工作区间如图5.10所示，图中内阻值为单个模块的内阻。

通过对发动机工作区域的划分以及蓄电池最优充放电SOC区域值的划分，将驱动模式下的工作状态分为6个区域，见表5-2。此外，将需求功率小于0的状态，定义为制动能量回收阶段。

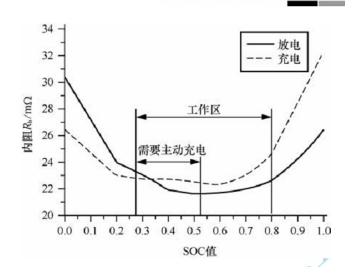


图 5.10 蓄电池内阻随 SOC 值变化的工作范围和充放电区间

表 5-2 增程模式工作状态

工作状态	SOC 条件	需求功率/kW
蓄电池单独工作	$0.33<SOC<0.8$	$P_{req}>0$
蓄电池单独工作	$0.27<SOC<0.33$	$P_{req}<5.4$
发动机单独工作	$0.27<SOC<0.33$	$5.4<P_{req}<41.8$
发动机和蓄电池联合驱动	$0.27<SOC<0.33$	$P_{req}>41.8$
发动机驱动发电	$SOC<0.27$	$P_{req}<41.8$
发动机单独驱动	$SOC<0.27$	$P_{req}>41.8$

根据以上的工作状态划分，得出控制流程状态转换逻辑框图如图 5.11 所示。

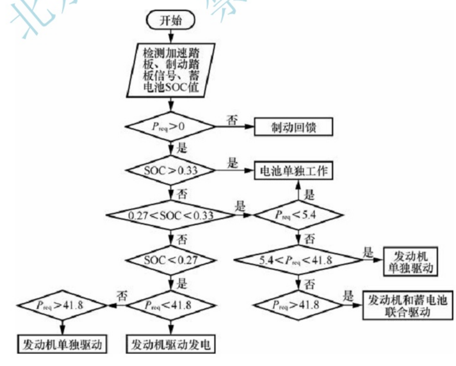


图 5.11 增程式电动汽车的状态转换逻辑框图

5.4 增程式电动汽车动力系统建模与仿真

通过建模仿真来模拟增程式电动汽车的实际运行工况，预测车辆在各种条件下的动力性能，既能够方便地对参数进行合理优化，调整设计方案，又能减少研发时间。Cruise 软件可以方便地建立多种车辆模型，用来模拟车辆的动力性、燃油经济性和排放性能，在软件中建立的模型可以非常直观地表示部件的结构布置，计算过程快速准确。Cruise 的典型应用是在车辆开发过程中对动力传动系统的研究，预测实车的动力性能、燃油消耗量、排放性能、制动性能等。

5.4.1 Cruise 平台整车建模

根据匹配出的动力系统数据以及已知的整车参数，在 Cruise 建立整车模型，如图 5.12 所示。

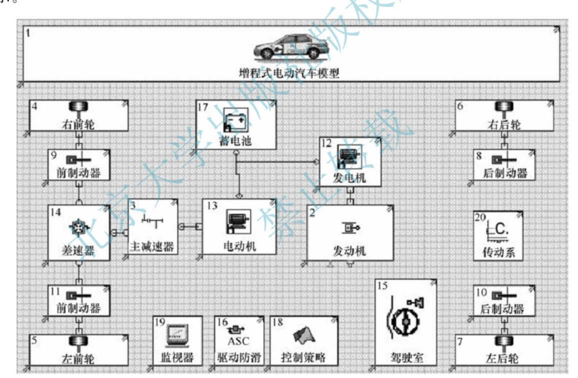


图 5.12 整车模型

整车结构采用前置前驱方案，模型包括整车模块、发动机模块、发电机模块、蓄电池模块、驱动电动机模块、主减速器、差速器、制动模块，用于整车动力性能、燃油消耗量和排放性的实时监测和仿真，还可以评价虚拟的主观平顺性。

1. 模块参数设计

模块的参数是根据所设计的动力传动系统部件和已有车型来确定的。对各个部件进行设置，以准确实现对匹配好的参数进行仿真分析，包括基本参数和性能参数的输入。模型的输入可以采用手工输入、从已有模型中调入数据、从已有数据文件中导入数据和拷贝与粘贴方式输入数据四种方式。

由于在Cruise软件中搭建的模型，较难实现增程式电动汽车各种工作模式的转换，所以模型中添加了MatLab控制模块，通过信号接口接收来自于驾驶员的输入信息、发动机信号、转速、制动信号等，如图5.13为控制模块定义的接口。Simulink控制模型以及Stateflow状态转化模型中的参数定义都是与这些接口模块匹配的。

MatLab DLL - Control Strategy

Description of Data Bus

Data Bus Channel	Description	Unit	Connection
Inport 0	Cockpit Load Signal		optional
Inport 1	Brake Pressure	bar	optional
Inport 2	Velocity	km/h	optional
Inport 3	SOC	%	optional
Inport 4	Start Switch		optional
Inport 5	Net Voltage	V	optional
Inport 6	Battery Current	A	optional
Inport 7	Battery Temperature	C	optional
Inport 8	Velocity_req	km/h	optional

图5.13　控制模块接口

2. 部件间的信息连接

部件之间的信息连接包括三种连接：机械连接、电气连接和总线信息连接。模型中实现的是整车系统中的机械连接和信号连接，其中机械连接又叫物理连接，电气连接实现了发电机和蓄电池以及蓄电池和电动机之间的连接。最后要设置模型中的总线信息连接，如图5.14所示，通过控制模块进行发动机的启停控制，采集信号以及将信号传递到控制模块输入端口，控制模块根据做好的控制策略进行判断，做出发动机的启停控制。

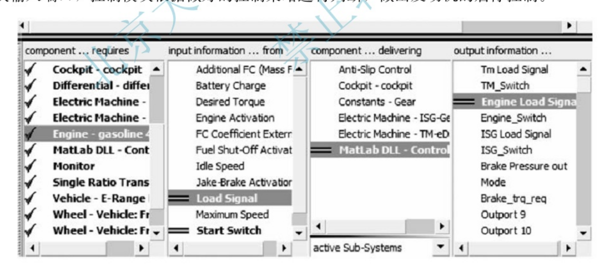


图5.14　总线信息连接图

总线信息连接其中最左边一栏列出来的是需要从别的零部件获得信息的部件，如发动机。

第二栏中定义了这个部件中所有需要的参数值，如节气门位置。这一列中标记有黑色的是必须连接的参数，带有黑色标记的参数可以根据需要选择性地连接。

第三栏中列出了可以传递这种参数或变量信息的部件，如驾驶室，驾驶室是可以传递节气门位置的唯一一个部件，因为节气门位置的开度是由驾驶员操作实现的。

第四栏为可以传递信息的部件，如节气门位置。在 Cruise 中，预先设定好这些总线信息连接，这些部件就可以采集和传递车辆信息。例如由驾驶室传递节气门位置信息到发动机控制模块，再由控制器决定发动机的输出转矩。

5.4.2 联合仿真模块

MatLab 接口模块是用来实现与 Cruise 的联合仿真，Cruise 软件与 MatLab 的接口允许客户自定义模型元件以及相关的控制策略，便于客户自己进行复杂控制。Cruise 与 MatLab 有三种连接方式：(1)Cruise Interface：Cruise 与 MatLab 的联合仿真分析(MatLab 在前台，而 Cruise 处在被调用状态)；(2) MatLab API：Cruise 与 MatLab 的联合仿真分析(Cruise 在前台，而 MatLab 处在被调用状态)；(3) MatLabDLL：通过 Simulink 模型生成的动态链接库(DLL)与 Cruise 进行耦合仿真。由于 Cruise 模型是非常完整的模型，采用第三种方法，通过生成 MatLab/Simulink 的 DLL 文件实现与 Cruise 的联合仿真，如图 5.15 所示。

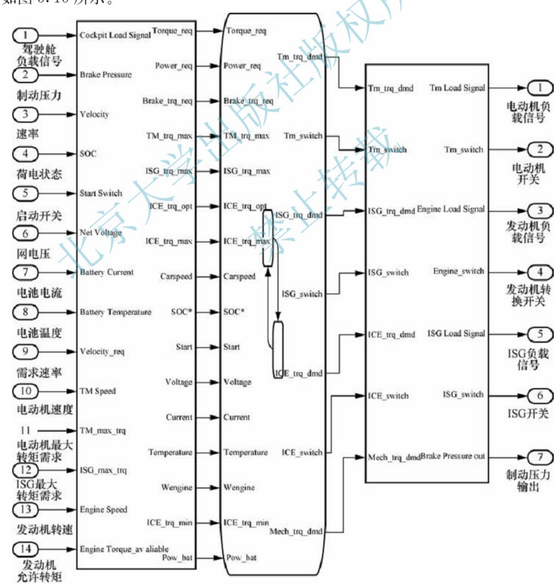


图 5.15 MatLab 与 Cruise 的接口文件

其中第一列为整车模型中 MatLab 控制模块的十四个接口，实现与 MatLab 的连接，以实现接口的识别，第一列为子系统参数模型，定义了从 Cruise 中采集的接口参数与其他参数之间的关系。其中发动机的转矩曲线是需要从 Cruise 中整车系统采集的数组模型。最右边为对应于 Cruise 软件中模型参数的七个输出接口：电动机负载信号、电动机开关、发动机负载信号、发动机开关转换、ISG 负载信号、ISG 开关、制动压力输出。

发动机的 Simulink 模型如图 5.16 所示。需要获得或输入的信息有：发动机的输出转矩、发动机最大转矩、最小转矩和由软件所采集监测到的发动机转矩信息。

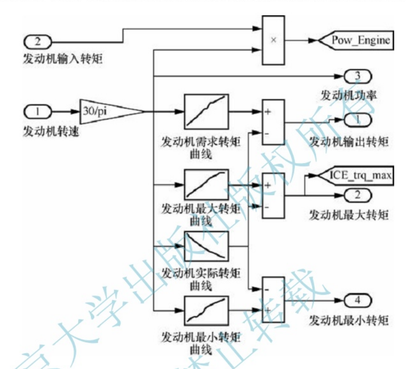


图 5.16 发动机的 Simulink 模型

中间部分为不同的工作模式状态装换条件 Stateflow 模型，如图 5.17 所示。

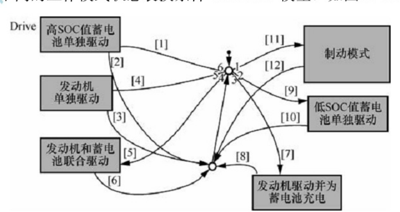


图 5.17 状态转换条件及转换时候的控制

Stateflow 模块由图形对象和非图形对象构成，模型中用方块表示系统的运行模式，带有方向箭头的线条表示状态转化的流向，每个运行模式状态都有执行条件和跳出条件，分别写在带箭头的线上。六个工作模式的状态转化条件见表 5-3，同时加入了车辆启停状态控制和制动能量回收模块。

表 5－3　Stateflow 模型中的状态转化条件

序号	工作状态	SOC 条件	需求功率/kW
1	转换到蓄电池单独驱动	0.33<SOC<0.8	$P_{req}>0$
2	跳出状态 1	SOC≤0.33	$P_{req}>0$
3	发动机单独驱动	0.27<SOC<0.33	$5.4<P_{req}<41.8$
4	跳出状态 3	SOC≤0.27 ‖ SOC≥0.33	$P_{req}\geqslant 41.8$ ‖ $P_{req}\leqslant 5.4$
5	发动机和蓄电池联合驱动	0.27<SOC<0.33	$P_{req}>41.8$
6	跳出状态 5	SOC≤0.27 ‖ SOC≥0.33	$P_{req}\leqslant 41.8$
7	发动机驱动和为蓄电池充电	SOC<0.27	$P_{req}<41.8$
8	跳出状态 7	SOC≥0.27	$P_{req}\geqslant 41.8$
9	蓄电池单独驱动	0.27<SOC<0.33	$P_{req}<5.4$
10	跳出状态 9	SOC≤0.27 ‖ SOC≥0.33	$P_{req}\geqslant 5.4$
11	制动	SOC<0.8	$P_{req}\leqslant 0$
12	跳出状态 11	SOC≤0.8	$P_{req}>0$

开关信号以及制动力矩模型如图 5.18 所示，其中制动力矩是与 Cruise 中车辆模型对应的，以实现不同软件中信号的识别。

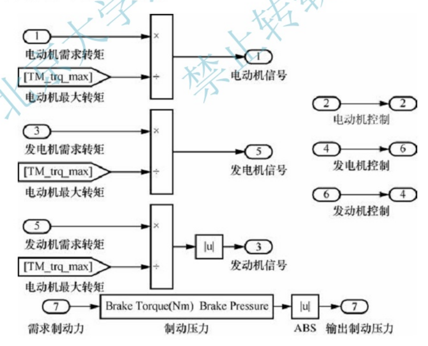


图 5.18　开关信号以及制动力矩模型

5.4.3　仿真结果

为了更加准确地仿真出增程式电动汽车的动力性、经济性、燃油消耗和排放等性能，对以下工况进行了仿真分析：①NEDC 循环行驶工况仿真，分别设置一个循环工况和多工



况循环下的燃料消耗量和排放性能试验仿真；②爬坡性能仿真；③满载加速性能仿真；④最高车速性能仿真。

选择 NEDC 仿真工况用做轻型车认证测试循环，NEDC 的车速和时间关系如图 5.19 所示，一个 NEDC 工况，又称为 28 工况，就是 13+15，有 X 档加速、减速和匀速等 28 种工况组成，4 个市区循环(4×195s)+1 个市郊循环(400s)。

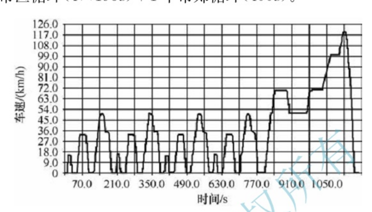


图 5.19 NEDC 循环行驶工况仿真工况车速

仿真也可以看作由两部分组成，前面部分 4 个 ECE(市区运转)循环工况，后面为 UDC(市郊运转)工况，一个工况 NEDC 的总时间为 1180s，运行距离为 117.2km。首先在一个 NEDC 循环下工作，仿真结果如图 5.20 所示。

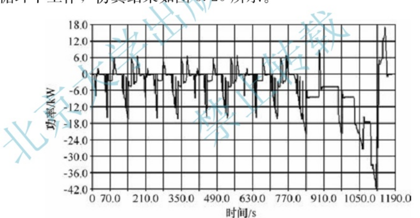


图 5.20 NEDC 循环行驶工况电池功率消耗

由于工况的运行距离为 11.2km，为纯电动行驶阶段，发动机和发电机起动，蓄电池 SOC 下降较小，从 0.8 下降到 0.72，由此可得纯电动行驶里程大约为 70km。因此纯电动行驶里程满足最初的设计目标。

从电动机功率曲线图上可以看出电动机功率跟随工况的变化情况，由于 NEDC 前面为多变的四个城市工况循环，电动机的功率变化较大，当功率为负的时候，为功率消耗区，负的功率为制动能量回收所增加的功率，可以看出在车速下降制动减速到零的过程中功率是由制动能量回收得到。由 Cruise 中的 result 文件可以读取出燃油消耗和排放都为 0，由于循环工况结束时 SOC 为 0.72，所以此工况循环为纯电动行驶，发动机和发电机不起动。

为了更好地观测纯电动行驶和增程模式的整个工况过程，选定三个 NEDC 工况，在多个工况下循环试验，检测燃油消耗、排放等性能指标。图 5.21 为 3 个 NEDC 循环工况的

目标速度曲线，运行结束的仿真结果如图 5.22～图 5.24 所示。

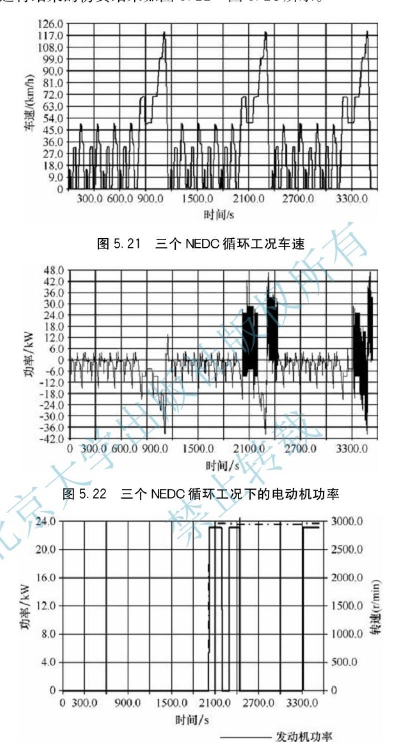


图 5.21　三个 NEDC 循环工况车速

图 5.22　三个 NEDC 循环工况下的电动机功率

图 5.23　三个 NEDC 循环工况下的发动机转速和功率

由三个图比较可以看出多工况下，蓄电池 SOC 降低到放电限值时，时间为 1900s，发动机开启，一部分能量提供给驱动电动机，另一部分能量为蓄电池充电，蓄电池 SOC 变化曲线也开始升高，此时的蓄电池功率有非常大的跳转，由放电时的负值变成了发动机为蓄电池充电时候的正功率。当蓄电池 SOC 上升到 0.6 时，约为 2450s，由于工况的原因，此时为 NEDC 中的城市循环工况，目标转速下降，车辆需求功率较小，根据 Stateflow 中

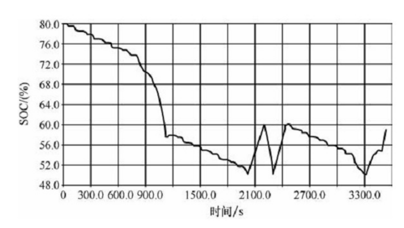


图 5.24 三个 NEDC 循环工况 SOC 变化图

状态转化条件，关闭发动机/发电机组，采用蓄电池的电能单独驱动汽车行驶。

读取三个 NEDC 工况时的 result 文件夹，可以得出燃油消耗仿真结果见如表 5-4，由表 5-4 可看出增程式电动汽车由于首先采用纯电动模式行驶，在长途行驶的时候，发动机/发电机组才启动，驱动汽车行驶，在增程模式下，当需求功率较小时，也采用关闭发动机/发电机组的控制策略，因此燃油经济性高，排放性能好。

表 5-4 燃油消耗仿真结果

项　　目	数　　值	项　　目	数　　值
工况	NEDC	燃油消耗率/(L/100km)	0.22
循环周期	3	总燃油消耗/kg	0.0544
时间/s	13540	怠速油耗/kg	0.0075
NO 排放/g	45.9	加速油耗/kg	0.0106
CO 排放/g	113.4	常速油耗/kg	0.0268
HC 排放/g	9.58	减速燃油消耗/kg	0.0095

爬坡度仿真结果见表 5-5，爬坡工况的电动机转矩和功率如图 5.25 所示，可以看出增程式电动汽车在不同车速时的爬坡度及爬坡性能远远超出了预期的设计目标要求。

表 5-5 爬坡度仿真结果

电动机转速/(r/min)	车速/(km/h)	爬坡度/(%)	电动机转速/(r/min)	车速/(km/h)	爬坡度/(%)
1000	18.73	44.24	5700	112.39	7.22
4000	74.93	13.80			

最高车速任务仿真所得的仿真结果是此增程式电动汽车的最高车速为 140km/h，与预期的设计目标一致。读取 result 文件获得的加速性能仿真结果为 3.2s，与预期的设计目标相比，加速能力的余量不大。

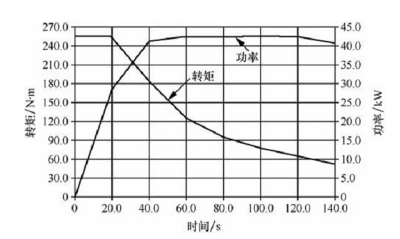


图 5.25　爬坡工况的电动机转矩和功率



1. 增程式电动汽车由哪几部分组成?
2. 增程式电动汽车有何特点?
3. 在增程式电动汽车设计中，如何匹配电动机、蓄电池和增程器的参数?
4. 增程式电动汽车控制策略主要有哪些?

第 6 章　混合动力汽车

国际电子技术委员会对混合动力车辆的定义为：在特定的工作条件下，可以从两种或两种以上的能量存储器、能量源或能量转化器中获取驱动能量的汽车。其中至少一种存储器或转化器要安装在汽车上。混合动力汽车至少有一种能量存储器、能量源或能量转化器可以传递电能。串联式混合动力车辆只有一种能量转化器可以提供驱动力，并联式混合车辆则有多种能量转化器提供驱动力。

6.1　概　　述

6.1.1　混合动力汽车的分类

1. 按连接方式分类

根据混合动力汽车零部件的种类、数量和连接关系可以将其分为以下 3 类。

(1) 串联式混合动力汽车(SHEV)；

(2) 并联式混合动力汽车(PHEV)；

(3) 混联式混合动力汽车(PSHEV)。

2. 按混合程度分类

按照电动机相对于燃油发动机的功率比大小可以将其分为以下 4 类。

(1) 微混混合动力汽车；

(2) 轻混混合动力汽车；

(3) 强混混合动力汽车；

(4) 全混混合动力汽车。

3. 按能否充电分类

根据混合动力汽车能否充电可以将其分为

(1) 插电式混合动力汽车(PHV)；

(2) 常规混合动力汽车(HEV)。

6.1.2　混合动力汽车的组成与原理

1. 串联式混合动力汽车

串联式混合动力汽车系统结构如图 6.1 所示。串联式结构是由发动机、发电机和驱动电动机三大主要部件总成组成的。发动机仅仅用于发电，发电机发出的电能通过电动机控制器直接输送到电动机，由电动机产生的电磁力矩驱动汽车行走。发电机发出的部分电能

向电池充电，来延长混合动力汽车的行驶里程。另外，电池还可以单独向电动机提供电能来驱动电动汽车，使混合动力汽车在零污染状态下行驶。

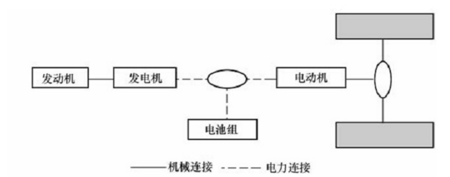


图 6.1　串联式混合动力汽车

在串联式混合动力汽车上，由发动机带动发电机所产生的电能和蓄电池输出的电能，共同输送给电动机来驱动汽车行驶，电力驱动是唯一的驱动模式，动力流程图如图 6.2 所示。电动机直接与驱动桥相连，发动机与发电机直接连接产生电能，来驱动电动机或者给蓄电池充电，汽车行驶时的驱动力由电动机输出。将存储在蓄电池中的电能转化为车轮上的机械能。当蓄电池的荷电状态 SOC 降到一个预定值时，发动机即开始对蓄电池进行充电。发动机与驱动系统并没有机械的连接在一起，这种方式可以很大程度地减少发动机所受到的车辆瞬态响应。瞬态响应的减少可以使发动机进行最优的喷油和点火控制，使其在最佳工况点附近工作。

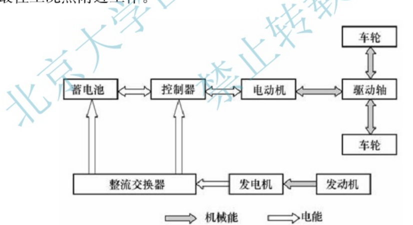


图 6.2　串联式混合动力汽车动力流程图

串联式混合动力汽车的发动机能够经常保持在稳定、高效、低污染的运转状态，使有害气体的排放被控制在最低范围。串联式混合动力汽车从总体结构上看，比较简单，易于控制，只有电动机的电力驱动系统，其特点更加趋近于纯电动汽车。三大部件总成在电动汽车上，布置起来有较大的自由度，但各自的功率较大，外形较大，质量也较大，因此，在中小型电动汽车上布置有一定的困难。另外，在发动机—发电机—电动机驱动系统中的热能—电能—机械能的能量转换过程中，能量损失较大。从发动机发出的能量以机械能的形式从曲轴输出，并立即被发电机转换为电能，由于发电机的内阻和涡流，将会产生能量损失(效率为 90%～95%)。电能随后又被电动机转换为机械能，在电动机和控制器中能量又进一步损失，平均效率为 80%～85%。能量转换的效率要比内燃机汽车低，故串联式混

合动力驱动系统较适合在大型客车上使用。

2. 并联式混合动力汽车

并联式混合动力汽车系统结构如图 6.3 所示，该结构主要由发动机、电动机/发电机两大部件总成组成，有多种组合形式，可以根据使用要求选用。两大动力总成的功率可以互相叠加，发动机功率和电动机/发电机功率为电动汽车所需最大驱动功率的 0.5～1，因此，可以采用小功率的发动机与电动机/发电机，使得整个动力系统的装配尺寸、质量都较小，造价也更低，行程也比串联式混合动力汽车的长一些，其特点更加趋近于内燃机汽车。并联式混合动力驱动系统通常被应用在小型混合动力汽车上。

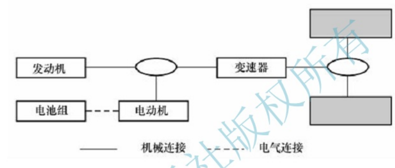


图 6.3　并联式混合动力汽车结构示意图

并联式驱动系统的典型动力流程图如图 6.4 所示。发动机和电动机通过某种变速装置同时与驱动桥直接相连接。电动机可以用来平衡发动机所受的载荷，使其能在高效率区域工作，因为通常发动机工作在满负荷(中等转速)下，燃油经济性最好。当车辆在较小的路面载荷下工作时，内燃机汽车的发动机燃油经济性比较差，而并联式混合动力汽车的发动机此时可以被关闭掉而只用电动机来驱动汽车，或者增加发动机的负荷使电动机作为发电机，给蓄电池充电以备后用(即一边驱动汽车，一边充电)。由于并联式混合动力汽车在稳定的高速下发动机具有比较高的效率和相对较小的质量，所以它在高速公路上行驶时具有比较好的燃油经济性。

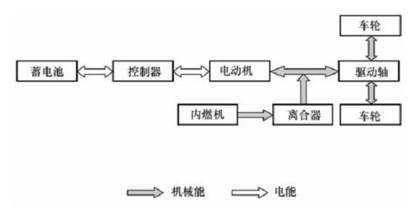


图 6.4　并联式混合动力汽车动力流程图

并联式驱动系统有两条能量传输路线，可以同时使用电动机和发动机作为动力源来驱动汽车，这种设计方式可以使其以纯电动汽车或低排放汽车的状态运行，但此时不能提供全部的动力能源。

并联式驱动系统的主要元件为动力合成装置，由于动力合成的实现方法具有多样性，相应的动力传动系统结构也多种多样，通常可将其分为驱动力合成式、转矩合成式和转速合成式3类。

(1) 驱动力合成式。驱动力合成式并联混合动力汽车示意图，如图6.5(a)所示。其采用一个小功率的发动机，单独地驱动汽车的前轮。另外一套电动机驱动系统单独地驱动汽车的后轮，可以在汽车起动、爬坡或加速时增加混合动力汽车的驱动力。两套驱动系统可以独立驱动汽车，也可以联合驱动汽车，使汽车变成四轮驱动的电动汽车。此种混合动力汽车具有四轮驱动汽车的特性。

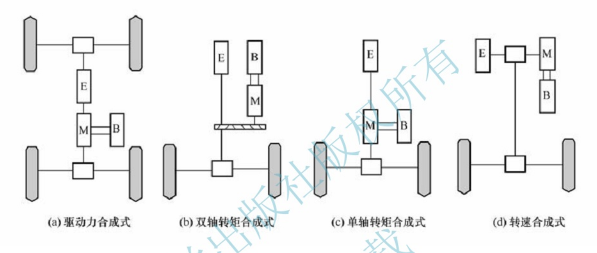


图6.5　并联式混合动力汽车的驱动方式

E—发动机；M—电动机；B—蓄电池

(2) 转矩合成式(双轴式和单轴式)。转矩合成式并联混合动力汽车示意图，如图6.5(b)、图6.5(c)所示。发动机通过传动系统直接驱动混合动力汽车，并直接(单轴式)或间接(双轴式)带动电动机/发电机转动向蓄电池充电。蓄电池也可以向电动机/发电机提供电能，此时电动机/发电机转换成电动机，可以用来起动发动机或驱动汽车。

(3) 转速合成式。转速合成式并联混合动力汽车示意图，如图6.5(d)所示。发动机通过离合器和一个“动力组合器”来驱动汽车，电动机也是通过“动力组合器”来驱动汽车。其可以利用普通内燃机汽车的大部分传动系统的总成，电动机只需通过“动力组合器”与传动系统连接，结构简单，改制容易，维修方便。通常“动力组合器”就是一个行星齿轮机构，这种装置使发动机或电动机之间的转速可以灵活的分配，但它们组合在特定的“动力组合器”中，因为“动力组合器”使它们的转矩固定在电动汽车行驶时的转矩上，要通过调节发动机节气门的开度来与电动机的转速相互配合，才能获得最佳传动效果，从而使得控制装备变得十分复杂。

3. 混联式混合动力汽车

混联式驱动系统是串联式与并联式的综合，其结构示意图如图6.6所示。发动机发出的功率一部分通过机械传动输送给驱动桥，另一部分则驱动发电机发电。发电机发出的电能输送给电动机或蓄电池，电动机产生的驱动力矩通过动力复合装置传送给驱动桥。混联式驱动系统的控制策略是：在汽车低速行驶时，驱动系统主要以串联方式工作；当汽车高

速稳定行驶时，驱动系统则以并联工作方式为主。

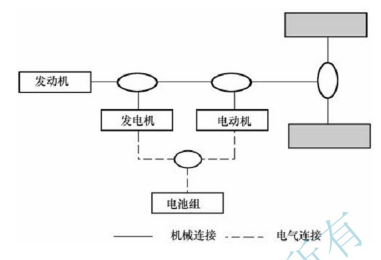


图 6.6 混联式混合动力汽车结构示意图

目前，混联式混合动力结构一般采用行星齿轮机构作为动力分配装置。有一种最佳的混联式结构是将发动机、发电机和电动机通过一个行星齿轮装置连接起来，动力从发动机输出到与其相连的行星架，行星架将一部分转矩传送到发电机，另一部分传送到传动轴，同时发电机也可以驱动电动机来驱动传动轴。这种机构有两个自由度，可以自由的控制两个不同的速度。此时车辆并不是串联式或并联式，而是两种驱动形式同时存在。这种形式充分利用了两种驱动形式的优点。其动力流程图如图 6.7 所示。

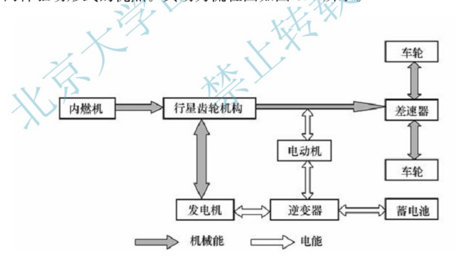


图 6.7 混联式混合动力汽车动力流程图

混联式驱动系统充分发挥了串联式和并联式的优点，能够使发动机、发电机、电动机等部件进行更多的优化匹配，从而在结构上保证了在更复杂的工况下使系统在最优状态工作，所以更容易实现排放和油耗的控制目标，因此是最具影响力的混合动力汽车。

与并联式相比，混联式的动力复合形式更复杂，因此对动力复合装置的要求更高。目前的混联式结构一般以行星齿轮机构作为动力复合装置的基本构架。

6.1.3 混合动力汽车的特点

混合动力汽车是将原动机、电动机、能量存储装置(蓄电池)等组合在一起，它们之间

的良好匹配和优化控制，可充分发挥内燃机汽车和电动汽车的优点，避免各自的不足，是当今最具实际开发意义的低排放和低油耗汽车。较之纯电动汽车，混合动力汽车具有如下的优点。

（1）由于有原动机作为辅助动力，蓄电池的数量和质量可减少，因此汽车自身重量可以减小。

（2）汽车的续驶里程和动力性可达到内燃机的水平。

（3）借助原动机的动力，可带动空调、真空助力、转向助力及其他辅助电器，无需消耗蓄电池组有限的电能，从而保证了驾车和乘坐的舒适性。

较之内燃机汽车，混合动力汽车具有如下的优点：

（1）可使原动机在最佳的工况区域稳定运行，避免或减少了发动机变工况下的不良运行，使得发动机的排污和油耗大为降低。

（2）在人口密集的商业区、居民区等地可用纯电动方式驱动车辆，实现零排放。

（3）可通过电动机提供动力，因此可配备功率较小的发动机，并可通过电动机回收汽车减速和制动时的能量，进一步降低汽车的能量消耗和排污。

显然，混合动力汽车研发的主要目的就是要减少石油能源的消耗，减少汽车尾气中的有害气体量，降低大气污染。

表6-1对不同类型的混合动力汽车在燃油经济性、尾气排放和控制难易程度等方面作了比较。表6-2对不同类型的混合动力汽车在驱动模式、传动效率、整车布置、适用条件等方面进行了比较。

表6-1　混合动力汽车类型的比较

项　　目	串联式	并联式	混联式
公路行驶燃油经济性	较优	优	优
城市行驶燃油经济性	优	较优	优
无路行驶燃油经济性	较优	优	优
低排放性能	优	较优	较优
成本	低	较低	较低
复杂程度	简单	较复杂	复杂
控制难易程度	简单	较复杂	复杂

表6-2　不同类型的混合动力汽车的特点

结构模型	串联式	并联式	混联式
动力总成	发动机、发电机、驱动电动机三大动力总成	发动机、电动机/发电机或电动机两大动力总成	发动机、电动机/发电机、电动机三大动力总成
驱动模式	电动机是唯一的驱动模式	发动机驱动模式、电动机驱动模式、发动机/电动机混合驱动模式	发动机驱动模式、电动机驱动模式、发动机/电动机混合驱动模式、电动机/发电机混合驱动模式

（续表）

结构模型	串联式	并联式	混联式
传动效率	能量转换效率较低	传动效率较高	传动效率较高
制动能量回收	能够回收制动能量	能够回收制动能量	能够回收制动能量
整车总布置	三大动力总成之间没有机械式连接装置，结构布置的自由度较大，但三大动力总成的质量、尺寸都较大，一般在大型车辆上采用	发动机驱动系统保持机械式传动系统，发动机与电动机两大动力总成之间被不同的机械装置连接起来，结构复杂，使布置受到一定的限制	三大动力总成之间采用机械装置连接，三大动力总成的质量、尺寸都较小，能够在小型车辆布置，但结构更加紧凑
适用条件	适用于大型客车或货车，适应在路况较复杂的城市道路和普通公路上行驶，更加接近电动汽车性能	适用于中小型汽车，适应在城市道路和高速公路上行驶，接近普通的内燃机汽车性能	适用于各种类型的汽车，适应在各种道路上行驶，更加接近普通的内燃机汽车性能

6.1.4 混合动力汽车的关键技术

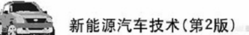
混合动力汽车以先进的控制技术为纽带，是传统燃油汽车与纯电动汽车的一种过渡性车型，其关键技术涵盖机电工程、电力电子、电化学、控制工程、汽车电子和车辆工程等多学科。混合动力汽车的关键技术包括驱动电动机及其控制技术、动力电池及其管理系统、整车能量管理控制系统、动力传动系统匹配、再生制动能量回收系统、先进车辆控制技术等。

1. 驱动电动机及其控制技术

电动机是电动汽车的心脏，对于混合动力汽车来说，电动机的重要性与发动机是等同的。混合动力汽车对驱动电动机的要求是能量密度高、体积小、质量轻、效率高。从发展趋势来看，电驱动系统的研发主要集中在交流感应电动机和永磁同步电动机上，对于高速、匀速行驶工况，采用感应电动机驱动较为合适；而对于经常起动、停车、低速运行的城市工况，永磁同步电动机驱动效率较高。

驱动电动机的控制技术包括大功率电子器件、转换器、微处理器以及电动机控制算法等。高性能的电力电子器件仍处于研究中，并且向微电子技术与电力电子技术集成的第四代功率集成电路方向发展。转换器技术随着功率器件的发展而发展，可分为DC/DC直流斩波器和DC/AC逆变器，分别用于直流和交流电动机。电动机控制微处理器主要有单片机和DSP芯片，目前电动机控制专用DSP芯片已被广泛采用，将微处理器与功率器件集成到一块芯片上（即PTC芯片），是目前的研究热点。

当前常规电动机驱动领域的控制方法如矢量控制、变压变频控制、模型参考自适应控制、直接转矩控制、自调整控制等都已被用到电动汽车的驱动控制中来，但电动汽车控制有其自身特点，要求在恒转矩、恒功率区都保持效率高、调速范围大、动态响应快等性能。从目前的实践看，感应电动机和永磁同步电动机矢量控制是比较好的控制方法。近年来兴起的变结构控制、模糊控制、神经网络控制以及专家系统控制等新兴控制方法也不断地在电动汽车中被采用，效果也较为理想。



2. 动力电池及其管理系统

动力电池是混合动力汽车的基本组成单元，其性能直接影响驱动电动机的性能，从而影响整车的燃油经济性和排放性能。混合动力汽车使用的电池工作负荷大，对功率密度要求较高，但体积和容量小，而且电池的 SOC 工作区间较窄，对循环寿命要求高。能否开发适合混合动力汽车的专用动力电池是决定混合动力汽车能否大量推广使用的重要因素之一。如何全面、准确地对动力电池进行管理，是决定动力电池能否发挥最佳效能的重要因素。

3. 整车能量管理控制系统

混合动力汽车的整车能量控制系统的主要功能是进行整车功率控制和工作模式切换的控制。整车能量控制系统如同混合动力汽车的大脑，指挥各个子系统的协调工作，以达到效率、排放和动力性的最佳，同时兼顾行驶车辆的平顺性。

整车能量控制系统根据驾驶员的操作，如加速踏板、制动踏板、变速杆的操作等，判断驾驶员的意图，在满足驾驶员需求的前提下，分配电动机、发动机、电池等动力部件的功率输出，实现能量利用率的最优管理，使有限的燃油发挥最大的功效。目前的混合动力汽车都不需要外部充电，与传统汽车一样，其整车驱动能量全部来自于发动机的燃油热能，电动机驱动所需的电能是燃油热能在车辆行驶中转换为电能后储存在蓄电池中的。能量管理策略的目标，就是使燃油能量转换效率尽可能高。

整车能量控制必须通过有效地控制混合动力系统的工作才能实现，此外，能量控制还需考虑其他车载电气附件和机械附件的能量消耗，如空调、动力转向、制动助力等系统的能耗，以综合考虑整车的能量使用。

4. 动力传动系统匹配

混合动力汽车动力传动系统的参数匹配是混合动力汽车设计的一个重要内容，其直接影响混合动力汽车的排放和燃油经济性能。它包括合理的选择和匹配发动机功率、动力电池容量和电动机的功率等，以确定车辆的混合度，来组成性能最优的混合驱动系统。

5. 能量再生制动回收系统

能量再生制动回收是混合动力汽车提高燃油经济性的又一重要途径。由于制动关系到行车安全性，如何在最大限度回收制动时的车辆动能与保证安全的制动距离和车辆行驶稳定性之间取得平衡，是再生制动回收系统需要解决的难题之一，再生制动回收系统与车辆防抱死制动系统的结合可以完美地解决这一难题。

6. 先进车辆控制技术在混合动力汽车上的应用

传统汽车的车辆动力学控制系统与混合动力控制系统以及制动能量回收控制的结合，将是混合动力汽车控制技术的下一个研究热点。混合动力汽车的再生制动系统与传统汽车的 ABS 系统的结合，在国外已经得到了较好的解决，而国内尚无真正的解决方案。另外，随着混合动力汽车研究的深入，传统汽车的驱动控制系统、车辆稳定性控制系统等如何与混合动力汽车的能量管理及动力控制系统相结合，将越来越显示出其重要性与必要性。传统汽车的控制技术与现代电动汽车控制技术的融汇集成，将使未来的混合动力汽车更加节能、舒适和安全。

6.1.5 混合动力汽车的主要技术指标

我国大规模商业化示范的插电式混合动力汽车主要技术指标见表6-3。

表6-3 大规模商业化示范的插电式混合动力汽车主要技术指标

指标		插电式混合动力轿车	插电式混合动力城市客车
动力电池	能量密度/(W·h/kg)	系统≥100	
	循环寿命/次	≥3000	
	日历寿命/年	≥10	
	目标成本/[元/(W·h)]	模块≤1.5	
车用电机	成本/[元/(W·h)]	≤200	≤300
	功率密度/(kW/kg)	≥1.8	
	最高效率/(%)	≥94	
电子控制		纯电动汽车电动化总成控制系统； 先进的纯电动汽车分布式控制系统； 纯电动汽车车载信息、智能充电和远程监控系统	
整车平台	最高车速	与传统汽车相当	
	纯电续驶里程/km	≥30	≥50
	附加成本/万	≤5	≤20

混合动力汽车产业化研发主要技术指标见表6-4。

表6-4 混合动力汽车产业化研发主要技术指标

指标			轿车	城市客车
动力电池	镍氢电池	能量密度/(W·h/kg)	系统≥30	系统≥40
		功率密度/(W·h/kg)	系统≥900	系统≥700
		使用寿命	25万公里或10年	
		系统目标成本/[元/(W·h)]	<3	
	功率型锂离子电池	能量密度/(W·h/kg)	≥50(系统)	
		功率密度/(W/kg)	≥1800(系统)	
		使用寿命	20万公里或10年	
		系统目标成本/[元/(W·h)]	<3	
	超级电容	能量密度/(W·h/kg)	≥5	
		功率密度/(W/kg)	≥4000	
		使用寿命	≥40万次或10年	
		系统目标成本/[元/(W·h)]	<60	

(续表)

指标		轿车	城市客车
车用电机	成本/[元(W·h)]	200	300
	ISG发电机 功率密度/(kW/kg)	＞1.5	＞2.7
	驱动电动机 功率密度/(kW/kg)	＞1.2	＞1.8
	系统最高效率/(%)	≥94	
电子控制		满足国Ⅳ和国Ⅴ排放法规的混合动力专用发动机(油电和气电)电控关键技术； 研制面向多能源动力总成技术需求的16位或32位机高性能控制器	
整车平台	节油率/(%)	≥25(中混) ≥40(深混)	≥40
	附加成本/万元	≤1.5	≤15

6.2 混合动力汽车动力系统设计

在混合动力汽车中，动力源部件的协调工作对整车的性能影响很大，尤其对混联式混合动力电动车。由于动力分配装置的存在，其对动力源部件的匹配及合理控制要求更高。

混合动力汽车获得高的燃油经济性主要通过以下原则来实现。

(1) 将较小型发动机安装在汽车上并使发动机在较高负荷下工作(获取较高的效率)。

(2) 将制动时产生的能量转换为电能用于汽车加速或为其提供动力。

(3) 采用高效率的电动机将汽车从静止状态起动起来。

下面以某汽车为例，保持原车的外形参数不变，只对其动力系统进行重新设计，动力系统采用混联式结构。

6.2.1 发动机

发动机由于自身特性的显著非线性，其真实模型相当复杂，通常采用高阶多项式近似方程进行模型描述，但多项式的阶数过高又不便于模拟计算，因此直接引用这些数学模型并不合适。为了解决这个问题，ADVISOR采用了实验数据建模法，即通过对大量的实验数据(如发动机的万有特性图和排放特性数据)分析处理获得描述发动机工作特性的近似方程。此处采用上面的几条原则对发动机功率进行设计。

发动机功率的选择对混联式混合动力传动系的设计至关重要。发动机功率偏大，车辆燃油经济性和排放性能就差；发动机功率偏小，后备功率就小，电动机只有提供更多的驱动功率，才能满足车辆一定的行驶性能要求，这势必引起电动机功率和电池组容量取值的增大和车辆成本的增加。另外，电池组数目增多，在车辆上布置困难，车质量增加，仅依靠发动机的富裕功率难以维持电池组的额定电量，限制了车辆的续驶里程。

因此，设计出一个能满足原车动力性能要求的小功率发动机是降低油耗和尾气排放的关键，同普通动力传动系相比，混合动力汽车发动机可限制在某一特定区域内工作，特定区域的选择可考虑使发动机燃油消耗最小和尾气污染物排放最少，即考虑发动机燃油消耗率较小的高负荷率区。考虑发动机单独驱动的情况，汽车行驶时的功率平衡方程式为

$$P_e = \frac{1}{\eta_T}\left(\frac{Gfu_a}{3600} + \frac{Giu_a}{3600} + \frac{C_D A u_a^3}{76140} + \frac{\delta m u_a}{3600}\frac{du}{dt}\right) \tag{6-1}$$

式中，P_e 为发动机输出功率；η_T为传动系统效率；G 为汽车重量；i 为汽车行驶路面的坡度；u_a为汽车行驶速度；C_D 为空气阻力系数；A 为迎风面积；δ 为旋转质量换算系数；m 为汽车质量。

根据式(6-1)，得到汽车在匀速行驶时各种坡度下的行驶车速与所需功率的关系曲线，如图 6.8 所示。

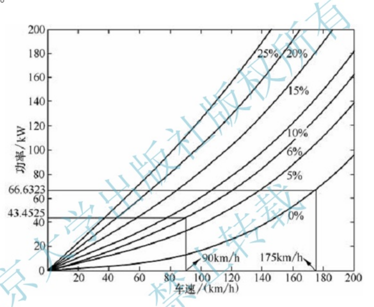


图 6.8 各种坡度下行驶车速与所需功率的关系曲线

原发动机的最大功率为 92kW，最高转速为 7500r/min。从图 6.8 中可以看出，汽车达到最高车速 175km/h 时，发动机只需发出约 67kW 的功率，由汽车的功率平衡图可以知道，当汽车在城市间高速路上以常规速度(即速度为 80～120km/h)行驶时，发动机具有很大的后备功率，即发动机的负荷率较低，燃油经济性较差。汽车在满载的情况下，在6%的坡度上以 90km/h 的速度行驶时，发动机只需发出大约 44kW 的功率。然而在混联式混合动力系统中，由于电动机的存在，发动机就减小用于加速和爬坡的后备功率，使发动机经常工作在较高的负荷率下来提高燃油经济性。当发动机发出 55kW 的功率时，汽车在水平路面上行驶时速可达到 164km/h，而汽车在城市间的高速路上行驶时一般不会超过140km/h，因此，设计发动机的最大功率为 55kW，这样既可以降低发动机的排量又可以提高发动机的负荷率，有利于排放和燃油经济性。同时，发动机的最高转速设计也很关键，发动机最高转速过高时会加剧部件之间的磨损，降低发动机效率，而发动机最高转速过低时可能造成最高车速降低。考虑到部件磨损和最高车速的合理性，通过对现有中小功率发动机进行分析，设计发动机最高转速为 6000r/min。

6.2.2 电动机

电动机在混联式混合动力电动车上起着很重要的作用，它既可以作为启动电机使用，又可以起到串联和并联结构中电机的作用，还可以在制动时作为发电机回收制动能量。因此，在混联式混合动力汽车上对以电动和发电模式下工作的电动机有更高的要求：恒转矩、恒功率(弱磁控制)工作，高效率的大功率输出，接近双倍功率的过载量(出现于车辆再生制动时的发电模式下，此时电动机转速变化范围在几转到上万转)。混合动力汽车上使用的电动机有直流电动机、永磁无刷电动机、感应电动机和开关磁阻电动机等。研究开发体积小、质量轻、工作可靠以及动态响应好的电动机，对混合动力汽车进一步提高动力性和燃油经济性极为重要。

1. 逆变器/电动机控制策略

在提出电动机工作特性和设计参数之间的关系之前，首先要说明逆变器/电动机的控制策略，它是牵引驱动系统中涉及电动机选型和设计在内的大多数因素的基本依据。电动机在最大输出时的逆变器/电动机控制策略如图 6.9 所示。

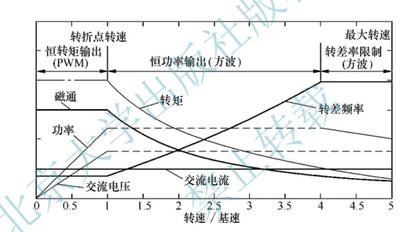


图 6.9 逆变器/电动机控制策略

电动机的转矩—速度曲线给出了牵引驱动期望的宽调速范围轮廓，它具有 3 个特征工作区：恒转矩、恒功率和有限转差。

恒转矩区是从零转速到基速。在这个区域里，逆变器在脉宽调制模式下工作，为电动机提供变化的频率和变化的电压。为了保持恒磁通，交流电压要随速度(频率)的变化而调整，因此，交流电压基本上随速度(频率)成正比增长。转子中感应电压频率(睡眠频率)保持恒定，且交流电流几乎不变，这就产生了几乎保持恒定的转矩。当然，由图 6.9 可知，电动机的输出功率与速度成正比，所以功率随速度上升到基速。这种控制方法在交流电压达到逆变器可提供的最大值之前是可行的。恒转矩区，电动机的工作特性与单独励磁的直流电动机相同。此后，电动机从恒转矩控制区步入恒功率控制区。

恒功率区的范围从基速到最大速度(恒功率区结束时刻的速度)。在这个区域里，逆变器给电动机提供可变频率，而交流电压保持不变。因此，电磁转矩与速度成反比减小，电动机输出功率几乎恒定。这种控制方法一直到电动机转差限制以前都是可行的，这个转差限制点是最大速度点，也即恒功率区切换到转差限制区的时刻。任何进一步提高速度都必

须保证转差频率的恒定，而且交流电流减小。在转差限制区，交流电压和磁通密度的变化与恒功率区一致，导致电磁转矩随速度平方成反比减小，同时电动机功率也减小。

转矩可以通过带有两挡或多挡变速器的齿轮箱传递到车轮上。当齿轮脱离低速齿轮(大传动比)而与高速齿轮(小传动比)啮合时，电动机在恒功率区易于操纵。车辆在市区行驶时的最大速度，例如80km/h，这仅需通过脚踏板调节的基本挡就可以实现。最好的解决办法是采用无级变速器，但这种方法成本太高，然而使得电动机铜损减少和调整电动机参数更好地满足车辆驱动要求成为可能。

2. 电动机功率设计

通常，适用于电动车辆使用的电动机外特性为：在额定转速以下，电动机以恒转矩模式工作；在额定转速以上，以恒功率模式工作。相应参数选取包括：电动机额定功率、电动机额定转速与电动机最高转速。

依据控制策略，电动机起动功率应满足汽车的最大爬坡度和加速时间要求。由于在确定发动机功率时已考虑了因发动机按照最小油耗线工作而需增加的功率裕量，为简单起见，可设汽车在混合驱动工况时，以最大速比原地起步加速或爬坡，节气门全开，当发动机转速达到最高功率对应的转速时，控制发动机保持在该点工作，并控制电动机保持在该转速下工作，调整发电机转速及速比来提高车速。

由最大爬坡度要求，得

$$F_{tmax}-mgf\cos\alpha_{max}-mg\sin\alpha_{max}-\frac{C_d A u_f^2}{21.15}=0 \tag{6-2}$$

由原地起步加速时间要求，得

$$t-\frac{1}{3.6}\int_0^u \frac{\delta m}{(F_t-F_f-F_w)}du=0 \tag{6-3}$$

式中，F_{tmax}为最大驱动力；α_{max}为最大爬坡度；u_f为最大驱动力所对应的车速；t为$0\sim u$的加速时间；u为车速；δ为旋转质量换算系数；F_t、F_f、F_w分别为驱动力、滚动阻力和空气阻力。

混合驱动的驱动力F_t和F_{tmax}都是电动机起动功率P_m的函数。使用MATLAB中的函数fzero求解，得到满足加速时间或最大爬坡度要求的最小电动机起动功率，取两者之中较大值作为电动机起动功率。数值整数化后为40kW。

电动机的最高转速对传动系的尺寸、电动机的额定转矩都有影响。电动机的最高转速与额定转速的比值，也称为电动机的扩大恒功率系数β。在电动机功率一定时，随β值的增大，转速降低；对应的电动机额定功率越高，对电动机的支撑要求越高。此外，高转矩需较大的电动机电流，其增大了功率变换器的尺寸和损耗，但大β又是车辆起步加速和稳定行驶所必需的，所以电动机传动轴额定转矩的减少只能通过选用高速电动机来解决。但这又影响传动比，所以必须协调考虑电动机最高转速和传动系尺寸。另一方面，增大β值也会使驱动轴转矩和齿轮应力增大，选择时还要考虑β值和齿轮应力，扩大恒功率区系数β，一般选择在4～6。此处对比于原有的交流感应电动机，考虑到上面因素的影响，选取电动机最高转速为9000r/min，扩大恒功率区系数$\beta=4.5$。

对仿真结果分析可知，当发动机、电动机与蓄电池功率不变，并且整车总质量不变时，改变电动机的功率值对整车的动力性与经济性影响非常微小，因此本车采用小型轻量高效的交流永磁同步电动机，功率为15kW，质量为33kg。

6.2.3 储能装置

目前，电化学蓄电池仍是多源混合驱动的一个基本组成元素，无论是在串联、并联还是在混联的混合传动结构中，电化学蓄电池都被用作辅助能源。大多数混合电动车辆在再生制动时就像通常的电动车一样：牵引电动机工作于发电模式；汽车的动能通过牵引电动机传递给蓄电池。

混合动力汽车上的蓄电池，其使用状况不同于电动汽车，在工作中蓄电池处于非周期性的充放电循环中，要求蓄电池的充放电速率和效率高，因此，混合动力汽车中使用的蓄电池不仅需要高能量密度，而且还需要高功率密度。研发高性能、低成本、寿命长的蓄电池，仍然是发展混合动力汽车的关键问题之一。

1. 蓄电池通用模型

蓄电池能量模型建立的基础是蓄电池的等效电路图，其等效电路图如图 6.10 所示。图中 R_{el} 为电解液电阻；R_e 为电极电阻；U_a 为蓄电池电压；i_a 为蓄电池负载电流；E 为电池端电压。

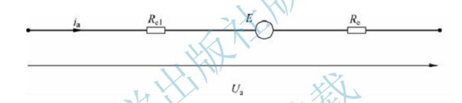


图 6.10　蓄电池的等效电路图

由蓄电池等效电路图，可计算出蓄电池两端的电压降 U_a。电压与电池的工作状态有关，计算如下：

放电时：
$$U_a = E - i_a R'_w \tag{6-4}$$

充电时：
$$U_a = E - i_a R''_w \tag{6-5}$$

根据图 6.10 给出的蓄电池等效电路图，可得蓄电池的通用模型如下：

蓄电池放电时：

$$Q_u(i_a, t, \tau) = c_\tau(\tau)\eta_A(i_a, t)Q_{\tau n} - \int_0^{t_i} i_a(t)\,dt \tag{6-6}$$

$$Q'_u(i_a, t, \tau) = Q_u(i_a, t, \tau) - \int_i^{t_{i+m}} \eta_A(i_a, \tau)^{-1} i_a(t)\,dt \tag{6-7}$$

$$k = c_\tau(\tau)\eta_A(i_a, \tau) - Q_{\tau n}^{-1}\int_0^{t_i} i_a(t)\,dt \tag{6-8}$$

$$k' = k - Q_{\tau n}^{-1}\int_i^{t_{i+m}} \eta_A(i_a, \tau)^{-1} i_a(t)\,dt \tag{6-9}$$

$$\eta_A(i_a, \tau) = \left[\frac{i_a(t)}{I_n}\right]^{-\beta(\tau)} \tag{6-10}$$

$$R'_w(i_a, t, \tau, k') = b\frac{E(k')}{i_a(t)} + l\left[k - Q_{\tau m}^{-1}\int_i^{t_{i+m}} \eta_A(i_a, \tau)^{-1} i_a(t)\,dt\right]^{-1} \tag{6-11}$$

$$u(t, k') = E(k') - i_a(t)R'_w(i_a, t, \tau, k') \tag{6-12}$$

$$\eta_{\mathrm{Ad}}(t)=\left[\sum_{i=1}^{m}\frac{E(k')_i}{u(t,\ k')_i}\right]^{-1} \tag{6-13}$$

蓄电池充电时：

$$k''=k'+Q_{\tau\mathrm{n}}^{-1}\int_{i}^{t_{i+m}}i_{\mathrm{a}}(t)\mathrm{d}t \tag{6-14}$$

$$\eta_{\mathrm{A}}(i_{\mathrm{a}},\ \tau)=0 \tag{6-15}$$

$$R''_{\mathrm{w}}(i_{\mathrm{a}},\ t,\ \tau,\ k'')=b\frac{E(k'')}{i_{\mathrm{a}}(t)}+l\left[k'+Q_{\tau\mathrm{m}}^{-1}\int_{i}^{t_{i+m}}i_{\mathrm{a}}(t)\mathrm{d}t\right]^{-1} \tag{6-16}$$

$$u(t,\ k'')=E(k'')-i_{\mathrm{a}}(t)R''_{\mathrm{w}}(i_{\mathrm{a}},\ t,\ \tau,\ k'') \tag{6-17}$$

$$\eta_{\mathrm{Ac}}(t)=\left[\sum_{i=1}^{m}\frac{E(k'')_i}{u(t,\ k'')_i}\right]^{-1} \tag{6-18}$$

蓄电池不工作时：

$$i_{\mathrm{a}}=0 \tag{6-19}$$

$$\eta_{\mathrm{A}}(i_{\mathrm{a}},\ \tau)=0 \tag{6-20}$$

$$\eta_{\mathrm{Aw}}(t)=0 \tag{6-21}$$

$$\eta_{\mathrm{Al}}(t)=0 \tag{6-22}$$

$$u(t,\ k)=E_{\min}+\Delta U_k \tag{6-23}$$

式中，i_{a}为蓄电池负载电流；t 为时间；τ 为温度；c_{τ} 为与温度有关的额定容量变化系数；$Q_{\tau\mathrm{n}}$为额定放电时间时的电池容量；Q_{u} 为蓄电池瞬时可用容量；η_{A}为蓄电池功率可利用系数；k 为蓄电池荷电状态值；β 为 Peukert 常数(铅酸电池为 0.325)；I_{n} 为额定放电电流；R'_{w}为蓄电池放电内阻；R''_{w}为蓄电池充电内阻；$E(k)$为蓄电池电动势；$u(t,\ k)$为蓄电池端点压；η_{Ad}为蓄电池瞬时放电效率；η_{Ac}为蓄电池瞬时充电效率；l 为内阻计算系数；b 为电池以电流 i_{a} 充、放电时，电池端电压相对于在额定容量条件下的电池端电压 E 的变化系数。

2. 蓄电池功率设计

上面所述蓄电池的通用模型均是时间的函数，具有动态特性，从而可以计算出蓄电池或使用蓄电池的整个传动系统的许多物理量的时间均值。

然而，具体的汽车行驶功率的变化与蓄电池的瞬时负载电流、电压和内阻的变化，特别是与蓄电池中能量变化密切相关。

对于给定类型的电池，使用其通用模型可计算出各种蓄电池荷电状态下的指标值。

内阻为

$$R_{\mathrm{w}}(t,\ k)=b(k)\frac{E(k)}{i_{\mathrm{a}}(t)}+\frac{l(k)}{k(t)}\quad k(t)\in[0,\ 1] \tag{6-24}$$

电动势为

$$E(t)=E(k) \tag{6-25}$$

在求解式(5-24)或式(5-25)所组成的方程组之前，要首先确定下列函数，即

$$\begin{aligned}b(t)&=b(k)\\ l(t)&=l(k)\end{aligned} \tag{6-26}$$

不可能采用试验的方法直接测量上面提到的各个量，也不可能在实车上实时记录各个量的值(通过测量监控)，只能通过以蓄电池电流和电压为输入的蓄电池模型来估算。确定

蓄电池动态的荷电状态值(k 值)，对于混合电动车的设计和保养来说是必要的。

在区间 $k \in \sum_{n=1}^{m}[k_{n-1}, k_n] \Rightarrow k \in (0, 1)$ 里，$k_n = k_{n-1} + \Delta k$，则按照迭代的方法获得的 $E(k_n)$，$b(k_n)$，$l(k_n)$是一系列的离散点。对不同的 Δk 值，经过一系列的仿真分析，得到结论：取 $\Delta k = 0.01$ 就可以足够准确地反映出电池内阻的变化趋势。

采用迭代近似法进行计算，可以得到的蓄电池电动势 E、系数 b 和 l 的特性曲线。在满足一定精度的情况下，可以用多项式来拟合蓄电池的特性。

为了保证蓄电池的寿命，通常要求蓄电池放电时的放电深度不大于 0.75。在蓄电池的放电过程中，希望蓄电池的放电电压保持恒定，为电动机提供一个稳定的工作条件。而蓄电池的电压是荷电状态的函数，混合动力汽车上蓄电池理想的工作区是 SOC 为 0.4～0.8。

蓄电池的容量及功率的大小会影响整车的燃油经济性，增大蓄电池的功率会使发动机的负担降低，改善经济性和排放性能，但是增大蓄电池功率的同时也会使整车的质量大大增加，又会降低动力性、经济性和排放性。在混联式驱动系统中，蓄电池和发电机可以同时供给电动机能量，暂时忽略能量流动中的损失，理论上使得蓄电池组功率与发电机功率之和等于电动机功率。因此，设计蓄电池组的功率为 25kW。

3. 蓄电池仿真模型

由于蓄电池在充放电时伴随有复杂的电化学反应，化学反应产生的热量导致蓄电池温度发生变化。因此，蓄电池的电化学特性是一个与各种随机变量相关的非线性函数。实际上，电化学电池动态模型的建立有两方面：一方面要从分析它的内在机理出发；另一方面还要借助试验测试来拟合非线性变量之间的关系。建模的基础是确定电池的电动势 E、内阻 R_{int} 的特性函数。特性函数的确定是基于对 R_{int} 随电池 SOC(SOC$\in$[0，1])变化关系的测试结果。这种建模方法建立的电池模型通常被称为内阻模型。蓄电池的输出功率受等效电路所能输出的最大功率或电动机功率控制器所能接受的最大功率的影响。并且约定，输出功率为正时，蓄电池处于放电状态；输出功率为负时，蓄电池处于充电状态。蓄电池能量模型可以通过蓄电池的等效电路图来描述。

1）蓄电池开路电压和内阻计算模块

这个模块根据给定的当前的 SOC 值和蓄电池的功率需求来计算单个电池的开路电压和内阻。模块首先根据 SOC 值和蓄电池的温度，采用插值法，分别求出开路电压和充电及放电时的内阻。得到的单个电池的电压与电池块数的乘积为总的开路电压输出值，单个电池的充电或放电内阻乘以电池块数并经过转换控制器得到合适的内阻。

2）功率限制模块

这个模块可以用来防止计算蓄电池负载电流的功率超出 SOC 值、等效电路的参数值和电动机控制器允许最小电压等的限制。

模型顶部是电池 SOC 值的判断，如果蓄电池电量耗尽，则控制蓄电池的输出功率为零。蓄电池最大输出功率受到 3 个参数的限制：电池组总电压、电动机功率控制器允许最小电压及电池组最小可用电压。蓄电池工作电压不能低于电动机最小驱动电压和蓄电池最低电压。如果这两个极限都没有超越，同时电压也等于开路电压的二分之一，那么此时将输出最大功率。

3）蓄电池负载电流计算模块

蓄电池负载电流计算模块将根据电功率的定义和基尔霍夫电压定律求解关于负载电流的二次方程，即 $R_{int}I^2-(V_{oc}\times I)+P_{bus}=0$。

模块上部是根据基尔霍夫电压定律计算负载电流。在充电过程中电压不能超出最大值，最大充电电流由式 $I=(V_{oc}-V_{max})/R$ 得到。得到的负载电流与开路总电压和蓄电池内阻结合，同样由基尔霍夫电压定律计算得到的负载电压。

4）SOC 计算模块

通过计算，可以得出荷电状态下 SOC 的近似值，从而可以确定蓄电池的剩余电量。这里涉及的库仑定律和电池最大容量均是电池温度的函数。

仿真开始时，通过计算所有放电电流和充电电流的总和，确定蓄电池总电量的变化，初始 SOC 被置为非零状态，蓄电池变化的电量与初始的电量求和得到剩余电量，剩余电量与蓄电池最大容量的比值即为电池的 SOC 值。

5）蓄电池散热模型

该散热模型可以预报车辆在行驶过程中和蓄电池充电期间蓄电池的平均温度和表面温度。

蓄电池采用自然风冷却方式。该散热方式有辐射和传导两种形式。由蓄电池内阻产生的热量和蓄电池表面热量计算出蓄电池的温度，将其反馈到自动调温器中，如果蓄电池温度超过设定温度就使冷却风开启，由此又可以得到蓄电池表面的热量和空气的温度，由蓄电池表面热量可以得到空气的热量。由反馈控制可以使蓄电池冷却。

6）蓄电池总成模型

根据上述建模方法，蓄电池模型根据动力总线的功率需求计算出蓄电池荷电状态 SOC 的近似值，并输出可用功率。功率损失按内阻损失加上库仑效率定律确定的功率损失计算。组合上面的主要模块生成蓄电池的总成模块图，如图 6.11 所示。

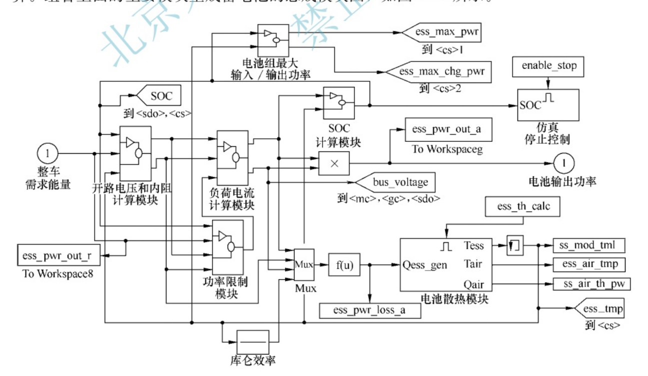


图 6.11　蓄电池总成模型

等效电路将蓄电池电动势和内阻当作串联电路上两个电路元件的电路参数。蓄电池所能够容纳的充电量被看作常数，并受到蓄电池最小开路电压的限制。蓄电池放电之后需要重新补充的电量受到库仑定律的影响，最大充电量受到蓄电池最大开路电压限制。当蓄电池完全被当作一个已知内阻的电压源时，与之相联接的部件，如发动机或电动机，就可被看作电源或耗能元件。蓄电池的输出功率受等效电路所能输出的最大功率或电动机功率控制器所能接受的最大功率的影响。

6.2.4 动力分配装置

在混联式混合动力传动结构中，用于实现能量分流和综合的动力分配装置是一个行星齿轮机构，其中行星架与发动机的输出轴相连，齿圈与电动机的转轴相连，同时也与输出齿轮相连，而太阳齿轮轴发出的动力驱动发电机发电，中间与一离合器相连，必要时锁死太阳轮，使行星齿轮机构以一定的传动比工作。发电机的转子刚性连接在发动机的输出轴上。动力分配装置如图 6.12 所示。

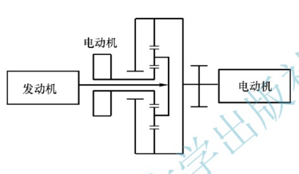


图 6.12 动力分配装置

通过对行星机构的变速比和受力分析可以得到如下方程组：

$$\omega_1+k_P\omega_2-(1+k_P)\omega_3=0$$
$$T_4=\frac{(1+k_P)}{\eta_S}T_1=\frac{(1+k_P)}{\eta_R k_P}T_2 \qquad (6-27)$$

式中，k_P 为齿数比，$k_P=z_2/z_1$；z_1 为太阳轮齿数；z_2 为齿圈齿数；η_S为由太阳轮到行星架的效率；η_R为由齿圈到行星架的效率；T_1、T_2、T_3 分别为太阳轮、齿圈和行星架的转矩；ω_1、ω_2、ω_3分别为太阳轮、齿圈和行星架的角速度。

作用在驱动轮上的转矩 T_t 是由发动机产生的转矩经过动力分配装置后传至车轮上的，因此驱动力为

$$F_t=\frac{T_{tq}i_0\eta_T}{r} \qquad (6-28)$$

式中，T_{tq}为作用在齿圈上的总转矩；i_0 为主减速器速比；η_T为传动系效率；r 为车轮半径。

由式(6-27)和式(6-28)可知，k_P 和 i_0 的取值对整车的动力性有很大的影响，与原车的动力性进行比较，改型后的汽车最高车速不小于 165km/h，0～100km/h 的加速时间不大于 13.5s，此处的动力分配机构作为变速器使用，与原车的变速箱传动比进行比较，根据前面动力源的设计与此处动力性的约束设计，可设计 $k_P=108:30$，$i_0=5.94$。

混联式混合动力系统的行星齿轮机构可以充分满足车辆用任何一种独立驱动模式或任何一种混合驱动模式，平稳有序地运转来带动车辆行驶，不会发生任何的运动干扰。用多能源动力总成控制模块，随机的转换车辆的驱动模式，使发动机和驱动电动机始终保持最佳效率状态。

6.2.5 整车仿真模型

分别对混联式混合动力电动车的各个重要模块进行了数学建模与仿真建模，把各个仿真模块封装起来，加入到混联式混合动力电动车的整车模型中，并进行连接，得到其总体框架如图 6.13 所示。

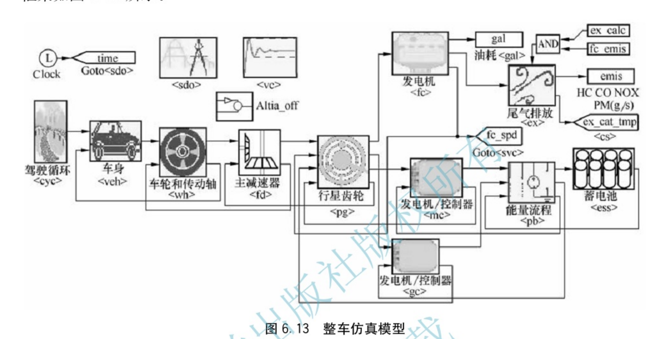


图 6.13 整车仿真模型

6.2.6 控制策略

混联式混合动力汽车有以下几种控制方法：①恒工作点控制方法。由于发动机的转速可以通过调节发电机的转速来调整，发动机的转矩和转速都可以不受制于汽车复杂的工况，驱动系统的控制策略与串联式 HEV 相似。②总功率损失最小化原则。功率的分配可以根据总功率损失最小来定义，包括所有零部件的总效率损失。③维持电池的 SOC 值。在这种方法中，当车辆需要较大的加速时，发动机和电动机同时驱动车轮。当需要比较小的驱动功率时，发动机被关闭，电动机输出驱动功率；当所需功率比较适中时，发动机驱动车轮并通过发电机来给蓄电池充电，充电功率根据 SOC 值的大小而不同。

混联式混合动力系统通过行星齿轮装置结构实现控制方法的可操作性。此处采用了以设定车速 V_{model} 和电池荷电状态 SOC 为控制信号的控制方法。通过动力分配装置的执行，灵活地选用最优的能量流动途径，其工作模式及能量流动如图 6.14 所示。

图中字母所代表的能量流动方向如下：

A：电池组→电动机→车轮。

B：发动机→车轮。

C：发动机→发电机→电动机→车轮。

D：发动机→发电机→电池组。

E：车轮→电动机→电池组。

车辆起动或轻载工况：此时，由于发动机不能有效地工作，所以关闭发动机，而由电动机单独驱动车辆。

(a) 起步或在低速下运行

(b) 减速或制动

(c) 正常行驶

(d) 蓄电池放电

(e) 全油门加速

图 6.14　工作模式

车辆正常行驶工况：此时，发动机输出功率的一部分用于直接驱动车辆，剩余部分经发电机转化为电能后向电动机供电(B)、(C)；

全节气门开度加速工况：此时，由电动机和发电机共同驱动功率(A)、(B)、(C)。

减速/制动工况：此时，电动机以发电模式工作，实现再生制动(D)。

电池组充电工况：当车载电池组电量偏低时，即使已经停车，发动机也应继续工作并对电池组进行补充充电(E)。

6.2.7　仿真实例

在汽车这样一个非常复杂的非线性动态系统中，单纯的建立数学模型来对设计变量进行优化是很不现实的，很多所谓的优化匹配都是使用动力性指标作为约束简单计算得来的，得到的数据只是建立在理论分析基础上的，并没有达到真正意义上的优化。可以使用仿真软件 ADVISOR 与数值计算的结合进行优化，效果显然高于简单的计算选取。在前面

合理设计的数据基础上会使所需测试的数据大大减小，加快优化速度。

由理论分析可知，在其他条件不变，只有三大动力元件功率变化(相应质量随着变化)的情况下，对于整车的动力性和燃油经济性有如下的函数关系：

0～100km 加速时间 t_{100} 为

$$t_{100}=F_1(P_e, P_m, P_b) \tag{6-29}$$

最大爬坡度 i_{max} 为

$$i_{max}=F_2(P_e, P_m, P_b) \tag{6-30}$$

燃油消耗量 g 为

$$g=G(P_e, P_m, P_b) \tag{6-31}$$

HC 排放量 g_H 为

$$g_H=G_H(P_e, P_m, P_b) \tag{6-32}$$

CO 排放量 g_C 为

$$g_C=G_C(P_e, P_m, P_b) \tag{6-33}$$

NO_x 排放量 g_N 为

$$g_N=G_N(P_e, P_m, P_b) \tag{6-34}$$

式中，P_e 为发动机功率；P_m 为电动机功率；P_b 为电池组功率。

上面的函数是复杂的多变量非线性函数，很难得到其具体的表达式。这就需要使用数值分析的方法，把仿真测试得到的有限个离散数据进行三维插值，可以得到需要范围内的任何数值。由于在此处的实际问题中功率的数值一般取为整数，故使用整数点插值即可。对各种性能的重要性进行加权分析，使用 MATLAB 中的 MIN 函数容易得到插值数据中的最小值，同时找出对应于最小值的设计变量值作为最终的设计结果。保持整车的外形尺寸不变，使用仿真模型测试数据，对测试数据进行插值计算并加权处理后进行优化，提取得到的设计结果：发动机功率为 40kW；蓄电池功率为 35kW；电动机功率为 48kW。

得到动力源优化分配的结果之后，再次使用仿真软件对整车的性能进行仿真分析，在 UDDS 循环工况下，分别对使用传统设计方法和优化设计方法得到的整车性能进行仿真分析。性能数据见表 6-5。

表 6-5 混合动力汽车性能数据

性能		原车性能	传统设计车性能	优化设计车性能
动力性	最高车速/(km/h)	＞170	＞170	＞170
	0～100km/h 加速时间/s	13.5	12.4	13
	60～120km/h 加速时间/s	＜12	10.6	11.4
	最大爬坡能力/(%)	25	＞25	＞25
经济性	多工况油耗/(L/100km)	7.5	5.1	4.4
排放性	NO_x/(g/km)	0.53	0.138	0.124
	CO/(g/km)	3.16	1.069	0.825
	HC/(g/km)	0.6	0.236	0.18

可以看出，改装后的汽车最高车速与原车的最高车速基本相等，加速能力和爬坡能力

稍稍要好于原车，重要的是油耗和排放明显要好于原车。由这些数据可以得到如下结论：在没有降低原车动力性的条件下，经改装的混联式混合动力电动车燃油经济性与排放性能都有明显的改善，达到节能和环保的目的。

同时发现，采用传统设计方法改装的车在动力性上稍好于采用优化方法改装的车，但在经济性上后者要远远好于前者。在车的动力性没有降低的情况下，盲目地提高动力性是没有必要的，这就说明了传统的设计方法得到的结果并不是最优解，优化出来的设计值才能使整车的综合性能达到最佳。

6.3 混合动力汽车制动能量回收系统

制动能量回收系统是混合动力汽车的重要组成部分之一，又称再生制动系统，是指汽车在制动或下坡时将储存于车身上的势能和动能，通过电动机转化为电能，并储存于储能装置中的过程。

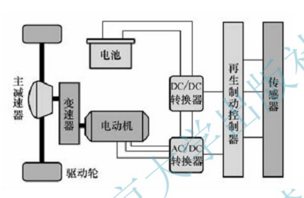


图 6.15 再生制动系统结构与原理图

再生制动系统的结构与原理如图 6.15 所示，由驱动轮、主减速器、变速器、电动机、AC/DC 转换器、DC/DC 转换器、能量储存系统以及控制器组成。

汽车在制动或滑行过程中，根据驾驶员的制动意图，由制动控制器计算得到汽车需要的总制动力。再根据一定的制动力分配控制策略得到电动机应该提供的电动机再生制动力。电动机控制器计算需要的电动机电枢中的制动电流，通过一定的控制方法使电动机跟踪需要的制动电流，从而较准确地提供再生制动力矩，在电动机的电枢中产生的电流经 AC/DC 转换器整流再经 DC/DC 转换器反充到储能装置中保存起来。

6.3.1 混合动力汽车制动力分配控制策略

混合动力汽车制动力由前、后轮制动器提供的制动力和电动机提供的再生制动力 3 部分组成，其中再生制动力只作用在驱动轮上。其采用 3 种制动力分配控制策略，即前后轮制动力理想分配时，比例分配时的控制策略及最优能量回收控制策略。

1. 前、后轮制动力理想分配时的控制策略

汽车制动时，如果前、后轮制动力理想分配，则前、后轮同时抱死，对附着条件的利用、制动时汽车的方向稳定性均有利。图 6.16 是电液制动系统原理图，它可以实现制动力的理想分配。

当驾驶员踩制动踏板时，由压力传感器得到制动力信息，在控制器中经过计算分别得到 4 个轮上的制动器制动力和电动机的再生制动力矩，将这些指令传送到各轮制动执行器和电动机控制器，由一定的控制方法，使得实际的制动力按需要的制动力变化。此时三通阀 1 口与 3 口相通，液体压力存储到蓄能器中，同时得到制动踏板的脚感。当控制器检测

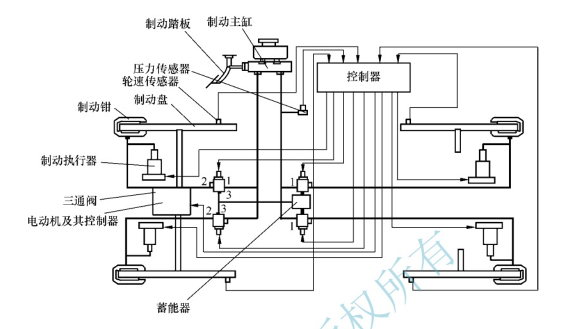


图 6.16　电液制动系统原理图

到车轮的制动执行器产生故障时，控制器发出控制信号，使该车轮对应的三通阀 1 口与 2 口相通，该车轮同样能得到制动的效果，保证了制动系统的可靠性。

图 6.17 为控制策略示意图。图中的最小后轮制动力曲线是根据我国行业标准提出的要求。法规规定，对于 $\varphi=0.2\sim0.8$ 的车辆，要求制动强度 $z\geqslant0.1+0.85(\varphi-0.2)$。

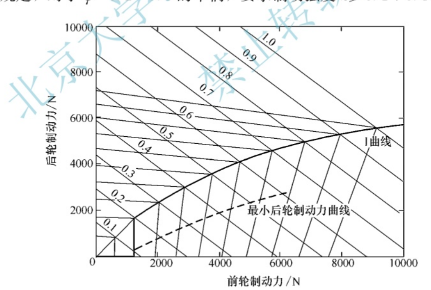


图 6.17　前、后轮制动力理想分配时的控制策略

图 6.17 所示横轴为前轴上的总制动力，纵轴为后轴上的总制动力。当制动减速度要求较小时，仅再生制动系统工作；当制动减速度增大时，前后轴制动力将被控制在理想制动力分配曲线上。其中前轴制动力等于再生制动力和机械制动力总和。当控制系统得到驾驶员的减速度要求时，前轴制动力将根据制动电动机的特性和车载能量存储系统的 SOC 值来决定驱动轴制动力是由再生制动系统单独提供，还是由机械制动系统和再生制动系统共同提供。

2. 前、后轮制动力比例分配时的控制策略

对轿车来说，空载和满载的I曲线很接近，只用比例阀就可以满足制动稳定性和附着系数利用率高的要求。如何才能在对原有制动系统进行小的改动情况下，从驱动轮分离出再生制动力呢？可以采用另外一种分配控制策略——并行制动。并行制动是指再生制动与机械制动以固定的关系分享驱动轮制动力。也就是说，驱动轮制动力等于再生制动力与机械制动力的总和。并行制动控制策略如图 6.18 所示。

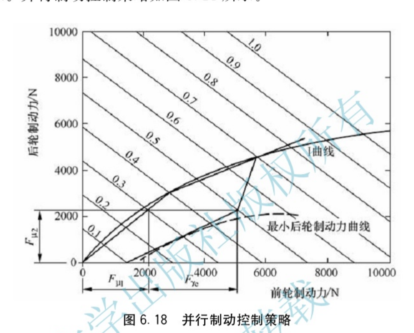


图 6.18　并行制动控制策略

当需要的制动力较小时，由再生制动力单独作用，其中包括对发动机制动的模拟；当需要的制动增大时，再生制动力所占的比例逐渐减小，机械制动力开始起作用；当总制动力大于一定值时意味着这是一个紧急制动，再生制动力减小到零，机械制动提供所有的制动力；当所需的制动力在两者之间时，再生制动与机械制动共同作用。

3. 最优能量回收控制策略

最优能量回收控制策略是指，当总制动力需求小于此时能提供的最大再生制动力时，仅由再生制动力起作用；当总制动力大于此时能提供的最大再生制动力时，总制动力减去最大再生制动力是应该提供的机械制动力，剩余的须提供的机械制动力将分配为前轮机械制动力和后轮机械制动力。前、后轮机械制动力的分配按照尽量使总的前、后轮制动力分配接近理想制动力曲线。

图 6.19 是最优能量回收控制策略的原理图。

可以看出，只要满足地面附着条件，前后轴的制动力可以在一定范围内变化，这个范围在图中用粗实线表示。其中，地面附着系数 0.7，制动强度 0.5 是假设值。在这种情况下，应该优先使用再生制动。

最优能量回收控制策略存在以下几种情况。

(1) 如果现有的最大再生制动力在 AB 线段，且在横坐标的投影范围内，如图 6.19 中点 C 在横坐标的投影，那么作用在前轴上的制动力应该由电动机单独提供，制动力控制器应该将后轮制动力控制在点 C 所对应的点上。

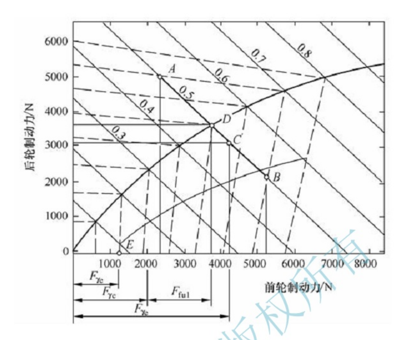


图 6.19　最优能量回收控制策略

(2) 如果现有的再生制动力在 A 点横坐标左边，再生制动力应该控制在电动机的最大制动力处，并且制动力控制器应该控制前、后轮摩擦制动力达到图中 D 点。

(3) 在需要制动力很小的情况下，如果再生制动力自已可以满足要求，则只用再生制动力。

从硬件组成的方面来考虑，前、后轮制动力理想分配时的控制策略和最优控制策略都需要一套专门的制动力控制系统来控制前、后轮的摩擦制动力，系统复杂，而并行制动控制策略可以在对原有制动系统做很小改动的情况下，通过控制电动机的电流来达到控制再生制动力，从而达到制动能量回收的效果。

6.3.2　混合动力汽车制动力分配控制策略的实现

下面以并联式混合动力汽车为例，介绍如何实现制动力分配控制策略。

ADVISOR 软件设计了车辆(Vehicle)、发动机(Fuel Converter，FC，又称燃料转换器)、蓄电池系统(Energy Storage System，ESS，又称能源储存系统)和电动机系统(Motor)等多个部件的仿真模型，图 6.20 所示为并联式混合动力汽车的仿真模型。每个仿真模型都有各自的部件数据文件，它们位于\ADVISOR 2002 \ data 目录下的各子目录中。

1. ADVISOR 中的制动力分配模型

ADVISOR 是集后向仿真与前向仿真于一体的软件。后向仿真程序通常不包括驾驶员行为模型，并且只能通过迭代预测最大极限性能。前向仿真包括了驾驶员模型，可以试图调整喉管和制动命令来跟踪预定的行驶工况。前向仿真程序擅长最大极限性能的计算，但是计算速度通常较慢。

2. 理想制动力分配策略实现

理想制动力分配时前轮和后轮的总制动力按照 I 曲线分配，而驱动轮上的摩擦制动力

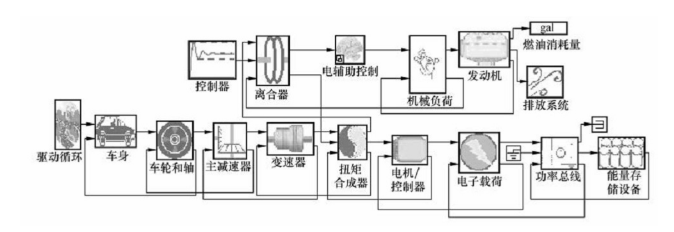


图 6.20　并联式混合动力汽车仿真模型

和再生制动力分配则是按照这样一个原则：当驱动轮上总的制动力小于等于此时能够提供的再生制动力时，只有再生制动力起作用；当驱动轮上总的制动力大于此时能够提供的再生制动力时，再生制动力工作在最大值，其他制动力由摩擦制动力补充。

理想制动力分配时的再生制动控制框图如图 6.21 所示。输入量为总制动力和电动机最大再生制动力矩，其中总制动力由制动踏板力传感器得到，电动机的最大再生制动力矩由存储在芯片中的电动机特性曲线和电动机转速信号通过查表得到。输出量为前轮(驱动轮)再生制动力、前轮摩擦制动力和后轮摩擦制动力。

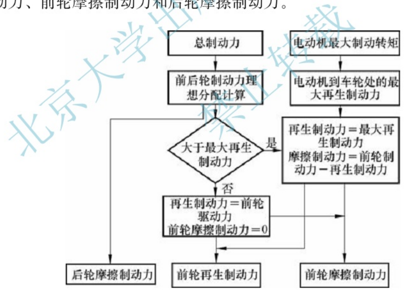


图 6.21　理想制动力分配时的再生制动控制框图

3. 并行制动力分配策略实现

并行制动力分配时前轮和后轮的总制动力按照图 6.18 分配，驱动轮上的再生制动力按照图 6.19 确定，驱动轮上的摩擦制动力大小等于驱动轮上总制动力减去驱动轮上的再生制动力。

并行制动力分配时的控制算法框图如图 6.22 所示。控制算法的输入量为总制动力，由制动踏板力传感器得到。再生制动力由存储在芯片中的再生制动力控制曲线得到，如图 6.19 所示。前后轮总摩擦制动力等于总制动力减去再生制动力，前后轮摩擦制动力

通过制动回路中的液压比例阀实现分配。控制算法的输出量为前轮(驱动轮)再生制动力、前轮摩擦制动力和后轮摩擦制动力。其中前轮(驱动轮)再生制动力由电动机控制单元实现控制。

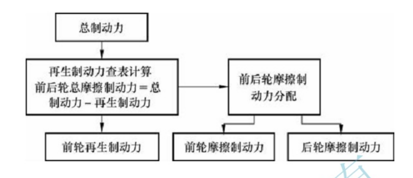


图 6.22 并行制动力分配时的再生制动控制算法框图

4. 最优制动力分配策略实现

最优制动力分配时，优先使用再生制动，即在总制动力小于等于此时能提供的最大再生制动力时，只使用再生制动；当总制动力大于再生制动力时，剩余部分的制动力由摩擦制动力提供，如图 6.23 所示。

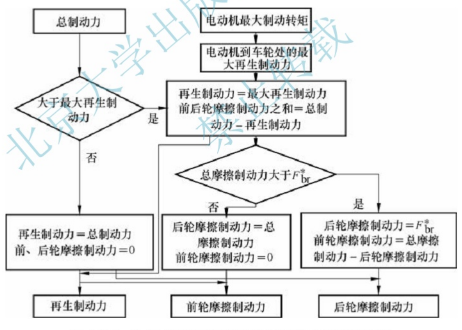


图 6.23 最优制动力分配时的再生制动控制算法框图

最优制动力分配时的控制算法框图如图 6.23 所示。控制算法的输入量为总制动力和电动机最大制动转矩。其中总制动力由制动踏板力传感器得到，电动机的最大再生制动力矩由存储在芯片中的电动机特性曲线和电动机转速信号通过查表得到。控制算法的输出量为前轮(驱动轮)再生制动力、前轮摩擦制动力和后轮摩擦制动力。这 3 个量分别输送到电动机控制单元、前轮摩擦制动力调节装置和后轮摩擦制动力调节装置。图中 F_{br}^* 为总制动力确定的前后轮理想分配时的后轮制动力。

将建立的 3 种控制策略模型嵌入到 ADVISOR 中可以建立混合动力车型的制动力控制

策略模型，通过仿真得到各种制动工况下的制动能量回收效率和制动力分配情况，研究再生制动控制策略的有效性。如果制动能量回收效率和制动力分配情况不理想，可以对控制策略模型进一步优化。这里不再介绍。

6.4 混合动力汽车的能量管理

作为一种新型的多能量源交通工具，混合动力汽车的性能与其采用的能量管理策略密切相关，能量管理策略是传统燃油汽车与纯电动汽车完美结合的纽带，是混合动力汽车成败的最终决定性因素。

能量管理策略的控制目标是根据驾驶员的操作，如加速踏板、制动踏板等，判断驾驶员的意图，在满足车辆动力性能的前提下，最优的分配电动机、发动机、动力电池等部件的输出功率，实现能量的最优分配，提高车辆的燃油经济性和排放性能。由于混合动力汽车中电池不需要外部充电，因此，能量管理策略还应考虑动力电池的荷电状态平衡，以延长电池寿命，降低车辆维护成本。

6.4.1 混合动力汽车的能量管理策略

混合动力汽车的结构不同，能量管理策略也不同。目前，国内外学者提出了各种各样的能量管理策略，下面给予简单介绍。

1. 串联式混合动力汽车的能量管理策略

由于串联式混合动力汽车的发动机与汽车行驶工况没有直接联系，因此其能量管理策略的主要目标是使发动机在最佳效率区和排放区工作。为了优化能量、分配整体效率，还应考虑传动系统的动力电池、发动机、电动机和发电机等部件。以下介绍串联式混合动力汽车3种基本的能量管理策略。

1）恒温器策略

当动力电池SOC低于设定的低门限值时，起动发动机，在最低油耗或排放点按恒功率模式输出，其中一部分功率用于满足车轮驱动功率要求，另一部分功率给动力电池充电。而当动力电池组SOC上升到所设定的高门限值时，发动机关闭，由电动机驱动车辆。其优点是发动机效率高、排放低；缺点是动力电池充放电频繁，加上发动机开关时的动态损耗，使得系统总体的损失功率变大，能量转换效率较低。

2）功率跟踪式策略

由发动机全程跟踪车辆功率需求，只有当动力电池的SOC大于SOC设定上限，并且仅由动力电池提供的功率能满足车辆需求时，发动机才停机或怠速运行。由于动力电池容量小，动力电池充放电次数减少而使得系统内部损失减少。但是发动机必须在从低到高的较大负荷区内运行，使得发动机效率和排放不如恒温器策略下发动机效率和排放。

3）基本规则型策略

该策略综合了恒温器策略与功率跟踪式策略两者的优点，根据发动机负荷特性图设定了高效率工作区，根据动力电池的充放电特性设定了动力电池高效率的荷电状态范围。并

设定一组控制规则，根据需求功率和SOC进行控制，以充分利用发动机和动力电池的高效率区，使其达到整体效率最高。

2. 并联式混合动力汽车的能量管理策略

并联式混合动力汽车的能量管理策略基本属于基于转矩的控制。目前主要有以下4类。

1）静态逻辑门限策略

该策略通过设置车速、动力电池SOC上下限、发动机工作转矩等一组门限参数，限定动力系统各部件的工作区域，并根据车辆实时参数及预先设定的规则调整动力系统各部件的工作状态，以提高车辆整体性能。其实现简单，目前实际应用较为广泛。但由于主要依靠工程经验设置门限参数，静态逻辑门限策略无法保证车辆燃油经济性最优，而且这些静态参数不能适应工况的动态变化，无法使整车系统达到最大效率。

2）瞬时优化能量管理策略

针对静态逻辑门限策略的上述缺点，一些学者提出了瞬时优化能量管理策略。瞬时优化策略一般是采用“等效燃油消耗最少”法或“功率损失最小”法，二者原理类似。其中“等效燃油消耗最少”法是将电动机的等效油耗与发动机的实际油耗之和定义为名义油耗，将电动机的能量消耗转换为等效的发动机油耗，得到一张类似于发动机万有特性图的电动机等效油耗图。在某一个工况瞬时，从保证系统在每个工作时刻的名义油耗最小出发，确定电动机的工作范围(用电动机转矩表示)，同时确定发动机的工作点，对每一对工作点计算发动机的实际燃油消耗以及电动机的等效燃油消耗，最后选名义油耗最小的点作为当前的工作点，实现对发动机、电动机输出转矩的合理控制。为了将排放一同考虑，该策略还可采用多目标优化技术，采用一组权值来协调排放和燃油同时优化存在的矛盾。等效燃油消耗最小方法在每一步长内是最优的，但无法保证在整个运行区间内最优，而且需要大量的浮点运算和比较精确的车辆模型，计算量大，实现困难。

3）全局最优能量管理策略

全局最优能量管理策略是应用最优化方法和最优化控制理论开发出来的混合动力系统能量分配策略，目前主要有：基于多目标数学规划方法的能量管理策略、基于古典变分法的能量管理策略和基于Bellman动态规划理论的能量管理策略3种。

研究最为成熟的是基于Bellman动态规划理论的能量管理策略。该方法首先建立了空间状态方程，然后计算在约束条件下满足性能指标的最优解。为了满足电池荷电状态平衡下的约束条件，采用拉格朗日乘子法推导出的性能指标，除了包含燃油消耗，还包括荷电状态变化量。采用迭代方法计算其拉格朗日系数，可以得到满足荷电状态平衡的约束条件最优解。该方法只适用于特定的驾驶循环，即必须预先精确知道车辆的需求功率，因而不能用于在线控制。

全局优化模式实现了真正意义上的最优化，但实现这种策略的算法往往都比较复杂，计算量也很大，在实际车辆的实时控制中很难得到应用。通常的做法是把应用全局优化算法得到的能量管理策略作为参考，以帮助总结和提炼出能用于在线控制的能量管理策略，如与逻辑门限策略等相结合，在保证可靠性和实际可能性的前提下进行优化控制。

4）模糊能量管理策略

该策略基于模糊控制方法来决策混合动力系统的工作模式和功率分配，其将“专家”

的知识以规则的形式输入模糊控制器中，模糊控制器将车速、电池 SOC、需求功率/转矩等输入量模糊化，基于设定的控制规则来完成决策，以实现对混合动力系统的合理控制，从而提高车辆整体性能。基于模糊逻辑的策略可以表达难以精确定量表达的规则；可以方便地实现不同影响因素(功率需求、SOC、电机效率等)的折中；鲁棒性好。但是模糊控制器的建立主要依靠经验，无法获得全局最优。

3. 混联式混合动力汽车的能量管理策略

混联式混合动力汽车由于其特有的传动系统结构，如采用行星齿轮传动，除了采用瞬时优化能量管理策略、全局优化能量管理策略和模糊能量管理策略(与并联式混合动力汽车能量管理策略原理类似)以外，还有一些特有的能量管理策略，即发动机恒定工作点策略和发动机最优工作曲线策略。

1）发动机恒定工作点策略

由于采用了行星齿轮机构，发动机转速可以独立于车速变化，这样可使发动机工作在最优工作点，提供恒定的转矩输出，而剩余的转矩则由电动机提供。电动机负责动态部分，避免了发动机动态调节带来的损失，而且与发动机相比，电动机的控制也更为灵敏，易于实现。

2）发动机最优工作曲线策略

发动机工作在万有特性图中最佳油耗线上，只有当发电机电流需求超出电池的接受能力或者当电动机驱动电流需求超出电动机或电池的允许限制时，才调整发动机的工作点。

6.4.2 混合动力汽车的工作模式

混合动力汽车的实际运行工况十分复杂，主要包括起步、加速、减速、巡航、上坡、下坡、制动、停车、倒车等。混合动力汽车是由两种动力源驱动，由于发动机和电动机两套动力系统分别具有不同的高效工作区，为了充分发挥混合动力系统的优势，汽车在不同的运行工况下，应具有多种不同的工作模式，以充分提高车辆整体性能。

1. 串联式混合动力汽车的工作模式

串联式混合动力汽车主要蕴涵以下工作模式。

(1) 纯电动模式。发动机关闭，车辆仅由蓄电池组供电、驱动。

(2) 纯发动机模式。车辆牵引功率仅来源发动机/发电机组，而蓄电池组既不供电也不从驱动系统中吸收任何功率，电设备组用作从发动机到驱动轮的电传动系。

(3) 混合模式。牵引功率由发动机—发电机组和蓄电池组共同提供。

(4) 发动机牵引和蓄电池充电模式。发动机—发电机组向蓄电池组充电和供给驱动车辆所需的功率。

(5) 再生制动模式。发动机—发电机组关闭，牵引电动机产生的电功率用于向蓄电池组充电。

(6) 蓄电池组充电模式。牵引电动机不接受功率，发动机/发电机组向蓄电池组充电。

(7) 混合式蓄电池充电模式。发动机—发电机组和运行在发电机状态下的牵引电动机共同向蓄电池组充电。

2. 并联式混合动力汽车的工作模式

并联式混合动力汽车主要蕴含以下工作模式：

（1）纯电动模式。当混合动力汽车处于起步、低速等轻载工况且动力电池的电量充足时，若以发动机作为动力源，则发动机燃油效率较低，并且排放性能差。因此，关闭发动机，由动力电池提供能量并以电动机驱动车辆。但当动力电池的电量较低时，为保护电池，应当切换到行车充电模式。

（2）纯发动机模式。在车辆高速行驶等中等负荷时，车辆克服路面阻力运行所需的动力较小，一般情况下，主要由发动机提供动力。此时，发动机可工作于高效区域，燃油效率较高。

（3）混合驱动模式。在加速或爬坡等大负荷情况下，当车辆行驶所需的动力超过发动机工作范围或高效区时，由电动机提供辅助动力同发动机一同驱动车辆。若此时动力电池的剩余电量较低，则转换到纯发动机模式。

（4）行车充电模式。在车辆正常行驶等中低负荷时，若动力电池的剩余电量较低，发动机除了要提供驱动车辆所需的动力外，还要提供额外的功率通过电动机发电以转换成电能给动力电池充电。

（5）再生制动模式。当混合动力汽车减速/制动时，发动机不工作，电动机尽可能多地回收再生制动能量，剩余部分由机械制动器消耗。

（6）怠速/停车模式。在怠速/停车模式中，通常关闭发动机和电动机，但当动力电池剩余电量较低时，需要开启发动机和电动机，此时控制发动机工作于高效区并拖动电动机为动力电池充电。

6.4.3 混合动力汽车模糊逻辑能量管理策略

以并联混合动力汽车为例。并联混合动力汽车的能量管理系统普遍采用分级分布式结构。最上层为能量管理系统的决策单元，统一协调和控制各个低端控制器；中间一层包括多个低端控制器；最下层为各个执行器。能量管理系统的决策单元接受驾驶员输入的指令、各个执行器的信息和环境信息，协调各子系统的工作。

1. 并联混合动力汽车的能量管理策略

对同一种并联形式的混合动力汽车来说，采用不同的管理策略可以得到不同的燃油消耗、排放和电池的SOC状态值。在设计混合动力汽车的时候，主要目的是在保证汽车性能的条件下降低汽车的燃油消耗和排放，同时，还要兼顾电池的寿命问题，基于这些目标，根据不同的侧重点，可以制定出不同的能量管理策略。

并联混合动力系统的整车能量管理策略主要解决系统运行模式的切换和混合模式下功率的分配。

并联混合动力系统有多种运行(能量流动)模式。根据不同的工况要求，以优化各部件工作点为目的，可以在这些运行模式中进行切换，主要有巡航模式、加速模式、减速模式、起步模式和驻车模式等，以适应不同的工况。

功率分配是系统能量管理策略研究的关键。通常功率分配都被看作是一个以减小油耗和改善排放为目标的优化问题。功率分配决定了混合动力系统中发动机的工作区域。根据优化程度(或者说发动机工作点选择方式)的不同，采用的功率分配策略也不同。大体上可

以分为：恒定工作点策略、优化工作区策略、ICE优化曲线策略、瞬时优化策略、全局优化策略、智能优化策略等。

结合模式切换和功率分配，并联混合动力汽车各运行模式下的能量管理策略如下：

(1) 起步。由于电动机具有低速大转矩的特性，所以混合动力汽车的起步由电动机单独来完成。当蓄电池SOC比较低的时候，由发动机来提供起步时的动力；如果蓄电池的剩余电量适中，即SOC值为中，则电动机驱动，发动机关闭；如果蓄电池的剩余电量多，即SOC值大，则电动机驱动，发动机关闭。

(2) 低速或城市工况。当混合动力汽车在城市道路或低速行驶时，若SOC值较高或为中的时候，汽车所需动力由电动机单独提供，电动机所需能量由蓄电池来供给；若SOC值较低时，汽车所需动力由发动机来提供，电动机转换为发电机为蓄电池充电。

(3) 加速。在加速模式下，控制策略主要是基于SOC状态来制订的，它主要是由电能源提供给汽车附加的驱动力的状态来决定的。主要考虑以下3种方式。

① 当SOC状态比较高时，若汽车此时是弱加速，电动机只提供部分功率来辅助发动机驱动汽车；若此时汽车是急加速，电动机则提供最大功率来辅助发动机。

② 当SOC状态为中时，无论汽车是弱加速还是急加速，发动机工作，而电动机驱动，提供部分功率辅助汽车的加速。

③ 当SOC比较低的时候，电动机空转，发动机的节气门全开。

(4) 巡航。当发动机以恒定的速度行驶时，由于汽车克服路面阻力保持恒定速度行驶时的转矩是很小的，所以，发动机主要提供平均功率而不是峰值功率。此时，当发动机的功率大于路面所需要的功率时，并当SOC较低时，电动机转换成发电机提供电能给蓄电池充电以满足下一步的使用要求。

(5) 减速。在这种模式下，会有部分制动能量回收，通常有松开加速踏板和踩下制动踏板两种模式。在第一种模式下，电动机的反拖作用使车速缓慢下降，若SOC值为小或为中时，部分制动能量被回收，此时发动机关闭，电动机提供部分负转矩来给蓄电池充电；在第二种模式下，车速迅速下降，若SOC值为小或为中时，大量的制动能量被回收，电动机提供最大的负转矩来给蓄电池充电，发动机关闭。如果蓄电池的剩余电量多，即SOC值为大，则电动机空转，发动机关闭。

(6) 驻车。当系统处于驻车模式时，此时汽车是不需要能量的，因此电动机空转，发动机关闭。若此时电池SOC状态比较低，则发动机开机驱动电动机给蓄电池充电。

2. 并联混合动力汽车模糊逻辑能量管理策略

由于汽车的各种不同工况下的能量需求，以及电池的不同SOC状态，混合动力汽车能量管理系统是个复杂的非线性系统，而模糊控制是基于模糊推理，模仿人的思维方式，对难以建立精确数学模型的对象实施的一种控制。它是模糊数学同控制理论相结合的产物。它具有不要求知道被控对象的精确数学模型，只需要提供现场操作人员的经验知识及操作数据；控制系统的鲁棒性适应于解决常规控制难以解决的非线性、时变及滞后系统；以语言变量代替常规的数学变量，易于构造形成专家的“知识”；控制推理采用“不精确推理”等优点。为了改善控制的性能，提高PHEV对各种工况的适应能力，通过对混合动力系统能量管理策略研究，将模糊控制这种智能控制技术引入到整车能量管理控制系统中来。

模糊逻辑能量管理策略的实现基于这样一个事实：蓄电池与电动机工作所需的电能，源于发动机的热能，在利用电驱动时，由于经过能量转换，导致能量损失一般大于发动机直接驱动的情况。但是，在某些工况下，电驱动的能量损失也可能小于发动机直接驱动的损失。例如，当汽车在低负荷行驶时，若由发动机直接驱动，其运行效率较低，总的能量利用效率即为运行效率；若由电驱动，总的能量利用效率要考虑电动机的机械效率、蓄电池的库仑效率以及蓄电池充电时发动机的运行效率。显然，若把蓄电池充电控制在发动机运行效率较高时进行，则蓄电池充电时发动机的运行效率大于发动机直接驱动时的运行效率，从而使由电驱动时总的能量利用效率大于发动机直接驱动时总的能量利用效率，即在某些工况下，利用电驱动是有利的。模糊逻辑能量管理策略通过综合考虑发动机、蓄电池和电动机的工作效率，可以实现混合驱动系统的整体效率最高。

3. 并联混合动力汽车模糊逻辑能量管理控制目标及原则

1）控制目标

模糊逻辑能量管理策略的目标主要是实现最佳燃油效率并兼顾排放和电池 SOC。最佳效率要求发动机平稳地工作在某一区域内，这一区域内发动机的燃油效率较高，并且是发动机最佳燃油曲线向两侧的适当延伸，图 6.24 所示虚线区域为发动机工作区间。兼顾电池 SOC 要求在一定的运行工况下，电池的 SOC 变化范围尽可能在电池使用寿命长、充放电效率高的区域，这里也体现了动态能量平衡原则。

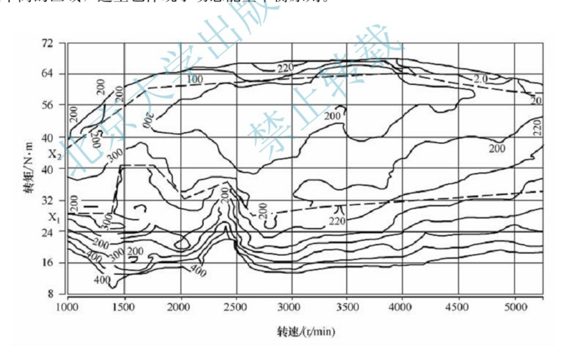


图 6.24 发动机工作区间定义

用模糊逻辑管理的方法是为了实现在不同驾驶员意图和不同路面环境下混合动力车辆的自动控制，以满足车辆行驶的不同要求，达到在保证蓄电池效率和使用寿命的情况下，既满足整车性能要求又获得较好经济性和排放的目标。

2）控制的主要原则

根据所提出的并联混合动力汽车整车能量管理策略，结合控制目标，确定模糊逻辑能量管理的控制原则如下：

(1) 为延长电池的使用寿命和提高电池的充放电效率，电池的SOC在循环工况的起始和结束时，应基本保持不变。

(2) 为提高整车系统效率，发动机应尽可能在高效率区工作，因此，在电池SOC允许情况下，对于起步或城市道路低、中速运行模式，尽可能用电动机起步或驱动。

(3) 在混合动力驱动系统中，控制系统将以发动机为主能源，电动机为辅助能源。管理系统根据汽车需求转矩与发动机最优转矩的差值，结合SOC状态，决定电动机工作状态，以此来调节发动机的工作状态，保证或尽量使发动机工作在最优燃油转矩曲线上。

(4) 在保证制动安全的前提下，回收制动能量。

4. 并联混合动力汽车模糊推理系统结构

MATLAB模糊逻辑工具箱提供了模糊逻辑控制器和系统设计的全部环节，包括定义输入和输出控制变量、设计隶属函数、编辑控制规则、选择推理方法及反模糊化方法等，并提供了GUI(图形用户界面)的形式，极大地方便了用户，不用在烦琐的计算中花费过多的时间，所有的规则的模糊运算、模糊蕴涵、模糊合成和反模糊化都由计算机来完成。

针对混合动力汽车在效率与排放、SOC状态值等控制方面的要求，应用MATLAB平台下的Fuzzy编辑器，建立两输入、一输出的模糊推理系统(Fuzzy Inference System，FIS)，其结构如图6.25所示。

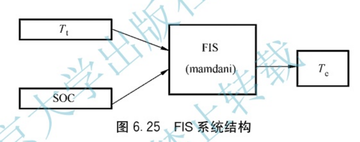


图6.25 FIS系统结构

5. 并联混合动力汽车模糊控制变量

图6.25中模糊推理系统的输入有两个变量，分别为下游动力传动部件总的请求转矩T_t和蓄电池的荷电状态SOC。两个变量分别用于表示整车和蓄电池的工作效率情况。其中，蓄电池的荷电状态与工作效率的关系很明显，而总的请求转矩表示的是负荷水平，与发动机的运行效率不直接相关，但是，通过建立发动机高效运行功率的模糊集可使它与发动机效率相关联。该模糊推理系统的输出变量为发动机转矩T_e。

1) 输入变量论域

输入变量T_t的论域为$[0, T_{max}]$，当驾驶员请求转矩高于T_{max}时，采用发动机工作于最大转矩线上的控制方法；当请求转矩小于零时，采用制动控制策略，即请求转矩全部由电动机提供，作为发电机为电池充电。因此模糊控制论域定为$[0, T_{max}]$。为方便起见，将输入变量论域转化到$[-3, +3]$上，“-3”表示零转矩，“0”表示优化转矩，“$+3$”表示最大转矩。其中优化转矩可以是优化燃油转矩曲线或最大效率曲线，这里采用优化燃油转矩曲线并参照ICE优化曲线控制策略图，如图6.26所示，图中优化转矩曲线表示的是优化燃油转矩曲线。

如图6.27所示，输入转矩T_t论域制定基于以下原则。

当输入变量$T_t \leqslant T_{opt}$(T_{opt}是优化转矩，即发动机优化燃油转矩)时，T_t论域为$[-3, 0]$；当输入变量$T_t > T_{opt}$时，T_t的论域为$[0, +3]$。

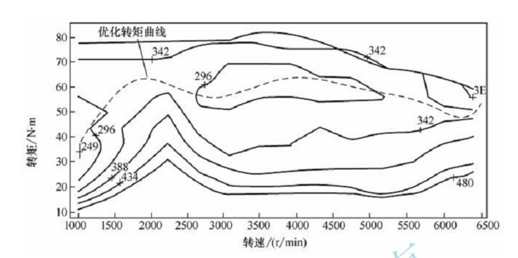


图 6.26 ICE 优化曲线控制策略

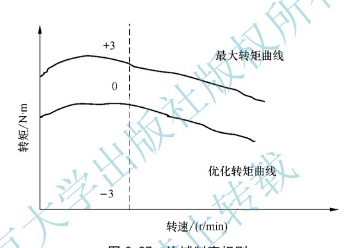


图 6.27 论域制定规则

将精确量 $[0, T_{opt}]$ 转化到区间 $[-3, 0]$ 的公式为

$$\overline{T}_t = \frac{3\times(T_t - T_{opt})}{T_{opt}} \tag{6-35}$$

将精确量 $[T_{opt}, T_{max}]$ 转化到 $[0, +3]$ 的公式为

$$\overline{T}_t = \frac{3\times(T_t - T_{opt})}{T_{max} - T_{opt}} \tag{6-36}$$

式中，$\overline{T}_t$ 为转化后的转矩值；T_t 为是实际输入的转矩值；T_{opt} 为优化燃油转矩值；T_{max} 为发动机最大转矩值。

输入变量 SOC 的论域为 [0，1]。"0" 表示 SOC 的最小值，"1" 表示 SOC 的最大值。

2）输出变量论域

模糊逻辑控制器的输出变量 T_e 的论域也在 $[-3, +3]$ 上，将其转化为实际输出转矩为 $[x_1, x_2]$ 上，这里 $[x_1, x_2]$ 为图 6.24 中的发动机工作区间的上下界。

3）控制变量模糊子集

通常情况下，像误差和误差变化等语言变量的模糊语言子集一般取为 {负大，负中，负小，零，正小，正中，正大} 或 {NB，NM，NS，ZE，PS，PM，PB} 等。因此，输入变量 T_t 和输出变量 T_e 模糊子集取为

{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}

或{NB，NM，NS，ZE，PS，PM，PB}

电池SOC的模糊子集取为

{太低，较低，低，适中，高，较高，太高}

或{very low，lower，low，normal，high，higher，very high}

其中输入变量T_t的模糊语言表述是通过比较请求转矩和优化转矩而得到的，如为“负大”时，表示请求转矩比优化转矩小很多；为“零”时表示请求转矩与优化转矩相等。

6. 控制变量的隶属函数

输入变量的隶属函数的设计主要根据发动机、蓄电池和电动机的效率MAP确定各自高效运行的模糊集。输入变量隶属函数的确定方法主要有模糊统计法、二元对比排序法、专家经验法和借助常见模糊分布等方法。输入变量和输出变量均选用钟型隶属函数。图6.28所示是输入变量T_t和输出变量T_e的隶属函数曲线，图6.29所示是输入变量电池SOC的隶属函数曲线。

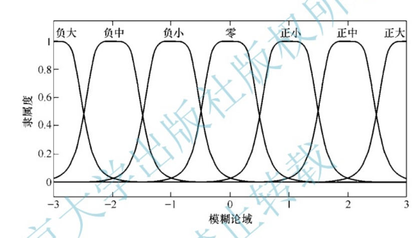


图6.28 输入变量T_t和输出变量T_e的隶属函数曲线

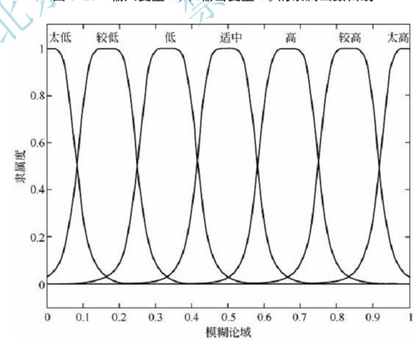


图6.29 输入变量电池SOC的隶属函数曲线

7. 模糊逻辑控制规则

控制规则是整个模糊逻辑控制环节的核心，每一条规则必须是准确的，而且能够反映设计者的控制意图。通过对初步建立的模糊规则进行多次修正和试凑，根据发动机工作模式和电池 SOC 的不同，按照在某一特定道路循环下电池充放电平衡的原则，建立转矩分配的控制规则：如果请求转矩与发动机优化转矩相比大很多，且电池 SOC 比较高，则控制发动机工作在最优燃油转矩曲线上，即电动机参与工作，提供辅助转矩；如果请求转矩在优化转矩附近；当电池 SOC 高时，控制发动机工作在低于最优燃油转矩曲线附近，当电池 SOC 较低时，控制发动机工作在最优燃油转矩曲线上；如果请求转矩比优化转矩小很多，当电池 SOC 高或为中时，控制发动机停止工作，由电动机提供驱动转矩；当电池 SOC 较低时，控制发动机工作在最优燃油转矩曲线附近，多余能量用于驱动电动机转化为发电机发电等控制规则。模糊控制模型中建立的相应模糊规则见表 6－6。

表 6－6 模糊逻辑控制规则

T_t / T_e / SOC	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
very low	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB
lower	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
low	NS	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB
normal	NM	NS	ZE	ZE	ZE	PS	PM
high	NM	NS	NS	ZE	ZE	ZE	PS
higher	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE	ZE
very high	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE

也可以用 IF…and…THEN 模糊语言来描述控制规则，现举例如下：

(1) IF T_t is NM and SOC is very low THEN T_e is NM。

(2) IF T_t is NS and SOC is low THEN T_e is ZE。

(3) IF T_t is ZE and SOC is normal THEN T_e is ZE。

(4) IF T_t is PM and SOC is high THEN T_e is ZE。

4 条控制规则的含义如下：

(1) 表示整车传动部件总的请求转矩比优化转矩小较多，并且电池 SOC 为很低时，发动机工作在低于最优燃油转矩曲线附近，直接输出驱动转矩，多余能量用于电动机转换为发电机给蓄电池充电。

(2) 表示整车传动部件总的请求转矩与优化转矩相差不大，并且电池 SOC 为低时，电动机不工作，发动机按最优燃油转矩曲线工作，直接输出驱动转矩。

(3) 表示整车传动部件总的请求转矩与优化转矩相等，并且电池 SOC 为正常时，电动机不工作，发动机按最优燃油转矩曲线工作，直接输出驱动转矩。

(4) 表示整车传动部件总的请求转矩比优化转矩大很多，并且电池 SOC 为高时，电动机参与工作提供辅助转矩，调节发动机按最优燃油转矩曲线工作。

8. 仿真结果

在并联混合动力整车仿真模型结构中，各动力总成采用 ADVISOR 原有模型并分别应用模糊逻辑管理策略和并联电辅助式管理策略进行仿真，各种性能的仿真结果(采用 1 个循环)比较见表 6-7。

表 6-7 性能仿真结果

管理	排放/(g/km)			油耗	动力性能		传动系统
策略类型	HC	CO	NO_X	(L/100km)	加速时间/s (0～96.6km/h)	最高车速/(km/h)	总效率/(%)
模糊逻辑	0.337	1.387	0.15	5.1	12.6	154	93.26
电辅助式	0.334	1.61	0.183	5.4	10.1	183.8	93.05

模糊逻辑能量管理策略的控制目标不仅在于提高发动机的工作效率，而是从系统整体效率出发，在兼顾排放和油耗的同时，对发动机、电动机和蓄电池的效率均予以考虑，是一种较理想的能量管理策略。电气辅助能量管理策略只是将电动机的优化工作区限定在一个范围内，对排放考虑较少，控制策略简单，因此其优化的效果也是有限的。

动力性能方面采用模糊逻辑管理策略后，汽车动力性在某些方面同采用电辅助管理策略相比有些下降，这是由于模糊逻辑管理策略进行折中计算的结果。相互对立的方面不可兼得，整体效率的提高是以动力性能的部分下降为前提的，但其结果完全可以满足正常行驶的需要。



1. 混合动力汽车有哪些类型？其特点是什么？
2. 在混合动力汽车设计中，如何确定发动机、电动机和蓄电池参数？
3. 混合动力汽车制动能量回收系统的功能是什么？
4. 混合动力汽车能量管理系统的功能是什么？

第 7 章　燃料电池电动汽车

采用燃料电池作电源的电动汽车称为燃料电池电动汽车(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)。FCEV 一般以质子交换膜燃料电池(PEMFC)作为车载能量源。

7.1　概　　述

7.1.1　燃料电池电动汽车的类型

FCEV 按主要燃料种类可分为以下两类。

(1) 以纯氢气为燃料的 FCEV;

(2) 经过重整后产生的氢气为燃料的 FCEV。

FCEV 按“多电源”的配置不同，可分为以下 4 类。

(1) 纯燃料电池驱动(PFC)的 FCEV;

(2) 燃料电池与辅助蓄电池联合驱动(FC+B)的 FCEV;

(3) 燃料电池与超级电容联合驱动(FC+C)的 FCEV;

(4) 燃料电池与辅助蓄电池和超级电容联合驱动(FC+B+C)的 FCEV。

1. 纯燃料电池驱动(PFC)的 FCEV

纯燃料电池电动汽车只有燃料电池一个动力源，汽车的所有功率负荷都由燃料电池承担。纯燃料电池电动汽车的动力系统如图 7.1 所示。

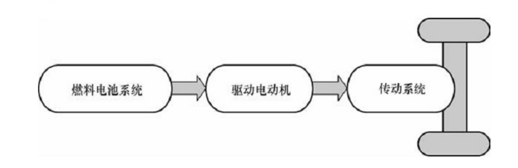


图 7.1　纯燃料电池驱动形式动力系统结构图

燃料电池系统将氢气与氧气反应产生的电能通过总线传给驱动电动机，驱动电动机将电能转化为机械能再传给传动系统，从而驱动汽车前进。

(1) 燃料电池系统的优点。

① 系统结构简单，便于实现系统控制和整体布置;

② 系统部件少，有利于整车的轻量化;

③ 较少的部件使得整体的能量传递效率高，从而提高整车的燃料经济性。

(2) 燃料电池系统的缺点。

① 燃料电池功率大、成本高;

② 对燃料电池系统的动态性能和可靠性提出了很高的要求;

③ 不能进行制动能量回收。

因此，为了有效地解决上述问题，必须使用辅助能量存储系统作为燃料电池系统的辅助动力源，和燃料电池联合工作，组成混合驱动系统共同驱动汽车。从本质上来讲，这种结构的燃料电池电动汽车采用的是混合动力结构。它与传统意义上的混合动力结构的差别仅在于发动机是燃料电池而不是内燃机。在燃料电池混合动力结构汽车中，燃料电池和辅助能量存储装置共同向电动机提供电能，通过变速机构来驱动汽车行驶。

2. 燃料电池与辅助蓄电池联合驱动(FC+B)的 FCEV

燃料电池+辅助蓄电池联合驱动的燃料电池电动汽车的动力系统如图 7.2 所示。该结构为一典型的串联式混合动力结构。在该动力系统结构中，燃料电池和蓄电池一起为驱动电动机提供能量，驱动电动机将电能转化成机械能传给传动系统，从而驱动汽车前进。在汽车制动时，驱动电动机变成发电机，蓄电池将储存回馈的能量。在燃料电池和蓄电池联合供能时，燃料电池的能量输出变化较为平缓，随时间变化波动较小，而能量需求变化的高频部分由蓄电池分担。

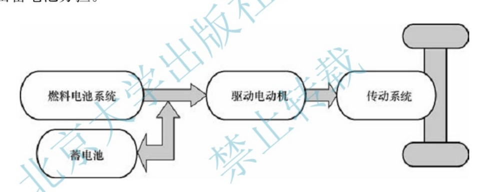


图 7.2 燃料电池+辅助蓄电池形式动力系统结构图

(1) 该系统的优点:

① 由于增加了比功率价格相对低廉得多的蓄电池组，系统对燃料电池的功率要求较纯燃料电池结构形式有很大的降低，从而大大地降低了整车成本;

② 燃料电池可以在比较好的设定的工作条件下工作，工作时燃料电池的效率较高;

③ 系统对燃料电池的动态响应性能要求较低;

④ 汽车的冷起动性能较好;

⑤ 制动能量回馈的采用可以回收汽车制动时的部分动能，该措施可能会增加整车的能量效率。

(2) 这种结构形式的缺点:

① 蓄电池的使用使得整车的质量增加，动力性和经济性受到影响，这一点在能量复合型混合动力汽车上表现更为明显;

② 蓄电池充放电过程会有能量损耗;

③ 系统变得复杂，系统控制和整体布置难度增加。

3. 燃料电池与超级电容联合驱动(FC+C)的 FCEV

这种结构形式与燃料电池+蓄电池结构相似，只是把蓄电池换成了超级电容。相对于蓄电池，超级电容充放电效率高，能量损失小，比蓄电池功率密度大，在回收制动能量方面比蓄电池有优势，循环寿命长，但是超级电容的能量密度较小。随着超级电容技术的不断进步，这种结构将成为重要的研究课题及发展方向。

4. 燃料电池与辅助蓄电池和超级电容联合驱动(FC+B+C)的 FCEV

燃料电池与蓄电池和超级电容联合驱动的电动汽车的动力系统如图 7.3 所示，该结构也为串联式混合动力结构。在该动力系统结构中，燃料电池、蓄电池和超级电容一起为驱动电动机提供能量，驱动电动机将电能转化成机械能传给传动系统，从而驱动汽车前进；在汽车制动时，驱动电动机变成发电机，蓄电池和超级电容将储存回馈的能量。在采用燃料电池、蓄电池和超级电容联合供能时，燃料电池的能量输出较为平缓，随时间变化波动较小，而能量需求变化的低频部分由蓄电池承担，能量需求变化的高频部分由超级电容承担。在这种结构中，各动力源的分工更加明细，因此它们的优势也得到了更好的发挥。

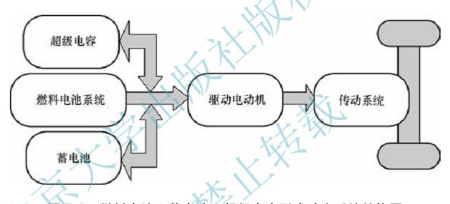


图 7.3 燃料电池+蓄电池+超级电容形式动力系统结构图

这种结构的优点相比燃料电池+蓄电池的结构形式的优点更加明显，尤其是在部件效率、动态特性、制动能量回馈等方面更有优势。

而其缺点也一样更加明显：

(1) 增加了超级电容，整个系统的质量将可能增加；

(2) 系统更加复杂化，系统控制和整体布置的难度也随之增大。

总的来说，如果能够对系统进行很好的匹配和优化，这种结构在给汽车带来良好的性能方面具有很大的吸引力。

在 3 种混合驱动中，FC+B+C 组合被认为能够最大限度满足整车的起动、加速、制动的动力和效率需求，但成本最高，结构和控制也最为复杂。目前燃料电池电动汽车动力系统的一般结构是 FC+B 组合。这是因为它具有以下特点：

(1) 燃料电池单独或与动力电池共同提供持续功率，而且在车辆起动、爬坡和加速等峰值功率需求时，动力电池提供峰值功率；

(2) 在车辆起步的时候和功率需求量不大的时候，蓄电池可以单独输出能量；

(3) 蓄电池技术比较成熟，可以在一定程度上弥补燃料电池技术上的不足。

可用于电动汽车的蓄电池包括铅酸电池、镍镉电池、镍锌电池、锌空气电池、铝空气电池、钠硫电池、钠镍氯化物电池、锂聚合物电池和锂离子电池等，有多种类型。

目前，FC+B混合驱动系统主要有两种结构形式：燃料电池直接混合系统和动力电池直接混合系统。

燃料电池直接混合系统是将燃料电池直接接入直流母线，所以驱动系统的电压必须设计在燃料电池可以调节的范围内，由于动力电池需要向驱动系统传输能量，和从燃料电池与车辆系统取得能量，所以必须安装双向DC/DC，且必须有响应速度快的特点。燃料电池和动力蓄电池之间的功率平衡由DC/DC和燃料电池管理系统共同实现。该结构形式对于燃料电池的输出电压达到了最优化设计。但是对燃料电池的要求比较高，同时DC/DC要实现双向快速控制，双向DC/DC的成本较高，整个系统的控制也比较复杂。

在动力电池直接混合系统中，DC/DC转换器将燃料电池的输出电压和系统电压分开，驱动系统电压可以设计得比较高，这样可以降低驱动系统的电流值，有利于延长各电器元件的寿命，同时高的系统电压可以充分满足动力电池的需要。DC/DC还负责燃料电池和动力蓄电池之间的功率平衡。但是由于燃料电池的能量输出需要通过DC/DC才能进入直流母线，导致系统的效率比较低，特别是对于连续负载来说不是最优化设计。例如匀速工况，系统功率需求较小，只由燃料电池单独提供车辆行驶所需的功率。

两种结构形式的主要差别在于DC/DC转换器的使用上。DC/DC的位置和结构决定了动力系统的构型。DC/DC的位置主要取决于电动机及其控制器特性和燃料电池的特性，另一个重要的因素是混合度。

7.1.2 燃料电池电动汽车的特点

1. 燃料电池电动汽车的优点

燃料电池汽车技术与传统汽车、纯电动汽车技术相比，具有以下优点。

(1) 效率高。燃料电池的工作过程是化学能转化为电能的过程，不受卡诺循环的限制，能量转换效率较高，可以达到30%以上，而汽油机和柴油机汽车整车效率分别为16%～18%和22%～24%。

(2) 续驶里程长。采用燃料电池系统作为能量源，克服了纯电动汽车续驶里程短的缺点，其长途行驶能力及动力性已经接近于传统汽车。

(3) 绿色环保。燃料电池没有燃烧过程，以纯氢作燃料，生成物只有水，属于零排放。采用其他富氢有机化合物用车载重整器制氢作为燃料电池的燃料，生产物除水之外还可能有少量的CO_2，接近零排放。

(4) 过载能力强。燃料电池除了在较宽的工作范围内具有较高的工作效率外，其短时过载能力可达额定功率的200%或更大。

(5) 低噪声。燃料电池属于静态能量转换装置，除了空气压缩机和冷却系统以外无其他运动部件，因此与内燃机汽车相比，运行过程中噪声和振动都较小。

(6) 设计方便灵活。燃料电池汽车可以按照X-By-Wire的思路进行汽车设计，改变了传统的汽车设计理念，可以在空间和重量等问题上进行灵活的配置。

2. 燃料电池电动汽车的缺点

(1) 燃料电池汽车的制造成本和使用成本过高。燃料电池发动机的制造成本居高不下，

国内约3万元/kW，国外成本约3000美元/kW，与传统内燃机仅200～350元/kW相比，差距巨大。使用成本过高，例如高纯度(99.999%)高压氢(>200bar，1 bar=10^5 Pa)1kg售价80～100元，按1kg氢可发10kW·h电能计算，仅燃料费即约为10元/(kW·h)，按燃料电池发动机工作寿命1000h计算，折旧费为30元/(kW·h)。所以总的动力成本达40元/(kW·h)。目前由燃料电池发动机提供1kW·h电能的成本远高于各种动力电池，这从一个侧面反映了作为汽车动力源，燃料电池还有相当的距离。

(2) 辅助设备复杂。且质量和体积较大。在以甲醇或者汽油为燃料的FCEV中，经重整器出来的“粗氢气”含有使催化剂“中毒”失效的少量有害气体，必须采用相应的净化装置进行处理，增加了结构和工艺的复杂性，并使系统变得笨重。目前普遍采用的氢气燃料的FCEV，因需要高压、低温和防护的特种储存罐，导致体积庞大，也给FCEV的使用带来了许多不便。

(3) 起动时间长，系统抗振能力有待进一步提高。采用氢气为燃料的FCEV起动时间一般需要超过3min，而采用甲醇或者汽油重整技术的FCEV则长达10min，比起内燃机汽车起动的时间长得多，影响其机动性能。此外，当FCEV受到振动或者冲击时，各种管道的连接和密封的可靠性需要进一步提高，以防止泄漏，降低效率，严重时引发安全事故。

7.1.3 燃料电池电动汽车对燃料电池的基本要求

FCEV对燃料电池性能基本要求有以下几方面：

(1) 燃料电池的比能量不低于150～200W·h/kg，比功率不低于300～400W/kg，要求达到或超过美国先进电池联合体(USABC)所提出的电池性能和使用寿命的指标。

(2) 可以在-20℃的条件下起动和工作，有可靠的安全性和密封性，不会发生燃料气体的结冰和燃料气体的泄漏。

(3) 各种结构件有足够的强度和可靠性，可以在负荷变化情况下正常运转，并能够耐受FCEV行驶时的振动和冲击。

(4) FCEV除排放达到零污染的要求外，动力性能要求基本达到或接近内燃机汽车的动力性能的水平，性能稳定可靠。

(5) 各种辅助技术装备的外形尺寸和辅助技术装备的质量应尽可能地减小，以符合FCEV的装车要求。

(6) 燃料充添方便、迅速。燃料电池能够方便地进行电极和催化剂的更换和修理。

(7) 所配置的辅助电源，应能满足提供起动电能和储存制动反馈电能的要求。

7.1.4 燃料电池电动汽车的关键技术

1. 燃料电池系统

燃料电池是燃料电池汽车发展的最关键技术之一。车用燃料电池系统的核心是燃料电池堆。燃料电池堆技术发展趋势可用耐久性、低温启动温度、净输出比功率以及制造成本4个要素来评判。燃料电池堆研究正在向高性能、高效率和更高耐久性方向努力。

降低成本也是燃料电池堆研究的目标，控制成本的有效手段是减少材料(电催化剂、电解质膜、双极板等)的费用，降低(膜电极制作、双极板加工和系统装配等的)加工费。

但是如何在材料价格与系统性能之间做一个平衡，依然需要继续研究。以电催化剂为例，非铂催化剂体系虽然在降低成本上有潜力，但是其性能却远远无法达到车用燃料电池系统的要求。人们一直努力降低铂的使用量，但即便是膜电极中有高负载量(如 Pt 担载量为 $1mg/cm^2$)，其性能也不能满足车用功率的需求。如何更有效地利用电催化剂的活性组分，使活性组分长期保持高活性状态，延长催化剂使用寿命，是催化剂研究应该考虑的重点。

另外，作为车用燃料电池系统还需要攻克许多工程技术壁垒，包括：系统启动与关闭时间、系统能量管理与变换操作、电堆水热管理模式以及低成本高性能的辅助设施(包括空气压缩机、传感器和控制系统)等。

2. 车载储氢系统

储氢技术是氢能利用走向规模化应用的关键。目前，常见的车载储氢系统有高压储氢、低温储存液氢和金属氢化物储氢 3 种基本方法。对于车载储氢系统，美国能源部提出在续驶里程与标准汽油车相当的燃料电池汽车车载储氢目标是：质量储氢密度 6Wt%、体积储氢密度 $60kg/m^3$。纵观现有储氢方法，除了低温储存液氢技术，其他技术都不能完全达到以上指标。而低温储存氢气的成本与能耗都很大，作为车载储氢并不是最佳选择。

如何有效减小储氢系统的重量与体积，是车载储氢技术研发的重点。一个比较理想的方案是，采用储氢材料与高压储氢复合的车载储氢新模式，即在高压储氢容器中装填重量较轻的储氢材料，这种装置与纯高压储氢方式(＞40MPa)相比，既可以降低储氢压力(约10MPa)又可以提高储氢能力。复合式储氢模式的技术难点是如何开发吸、放氢性能好，成型加工性良好、质量轻的储氢材料。

3. 车载蓄电系统

车载蓄电系统包括铅酸电池、镍氢蓄电池、锂离子电池等蓄电池及电化学超级电容器。铅酸电池作为汽车起动电源已经十分成熟，但由于其功率密度低，充电时间长，作为未来电动汽车动力系统的可能性很小；镍氢蓄电池具有高比能、大功率、快速充放电、耐用性优异等特性，是目前混合动力汽车和电动汽车中应用最广的绿色动力蓄电系统；锂离子电池具有比能量大、比功率高、自放电小、无记忆效应、循环特性好、可快速放电等优点，已进入电动汽车动力电源行列。

超级电容器能在短时间内提供或吸收大的功率(为蓄电池数十倍)。其效率高、具有上万次的循环寿命和极长的储存寿命、工作温度范围宽、能使用的基础材料价格便宜，可以作为混合型动力汽车的有效蓄电系统。但其能量密度低，能否作为独立的车用动力系统大规模推广，还有待更多的运行数据佐证。

4. 电动机及其控制技术

驱动电动机是燃料电池电动汽车的心脏，它正向大功率、高转速、高效率和小型化方向发展。当前驱动电动机主要有感应电动机和永磁无刷电动机。永磁无刷电动机具有较高的功率密度和效率、体积小、惯性低和响应快等优点，在电动汽车方面有着广阔的应用前景。由感应电动机驱动的电动汽车几乎都采用矢量控制和直接转矩控制，矢量控制又有最大效率控制和无速度传感器矢量控制。前者是使励磁电流随着电动机参数和负载条件的变

化，从而使电动机的损耗最小、效率最大；后者是利用电动机电压、电流和电动机参数来估算出速度，不用速度传感器，从而达到简化系统、降低成本、提高可靠性的目的。直接转矩控制克服了矢量控制中需要解耦的不足，把转子磁通定向变换为定子磁通定向，通过控制定子磁链的幅值以及该矢量相对于转子磁链的夹角，从而达到控制转矩的目的。由于直接转矩控制手段直接、结构简单、控制性能优良和动态响应迅速，因此非常适合用于电动汽车的控制。

5. 整车布置

燃料电池汽车在整车布置上存在以下关键问题：燃料电池发动机及电动机的相关布置、动力电池组的车身布置、氢气瓶的安全布置以及高压电安全系统的车身布置等。这些核心部件的布置，不仅要考虑布置方案的优化及零部件性能实现的便利，还要求相关方案必须考虑传统汽车不具备的安全性问题。目前经过国内外几轮样车试制的过程来看，燃料电池发动机及电动机同时进前舱是一种技术趋势，动力电池组沿车身主轴纵向布置好于电池组零星布置，氢气瓶的布置更多地要考虑碰撞安全性。

6. 整车热管理

燃料电池汽车整车热管理有两方面特性需要关注：

(1) 燃料电池发动机自身的运行温度为60～70℃，实际的散热系统工作温度大致可以控制在60℃。这样一来与整车运行的环境温度相比，温差不大，造成燃料电池汽车无法像传统汽车一样依赖环境温差散热。转而必须依赖整车动力系统提供额外的冷却动力为系统散热。这样从动力系统效率角度出发是不经济的，二者之间的平衡将是在热管理开发方面必须关注的。

(2) 目前整车各零部件的体积留给整车布置回旋的余地很小，造成散热系统设计的改良空间不大，无法采用通用的解决方案应对，必须开发专用的零部件(如特殊构造或布置的冷凝器、高功率的冷却风扇等)。这样就要求有丰富的整车散热系统的基础数据以支持相关开发设计，而这点正好是目前国内整车企业欠缺的。

另外，与整车散热系统密切相关的车用空调系统开发也是整车企业必须关注的。由于燃料电池汽车没有传统的汽油发动机，传统空调的压缩机动力源发生了颠覆性变化，改用纯电动压缩机作为空调系统的动力源。这样在做整车散热系统需求分析时，空调系统性能需求作为整车散热系统的“负载”因素也成为散热系统开发的技术难点。

7. 整车与动力系统的参数选择与优化设计

燃料电池汽车整车性能参数是整个燃料电池动力系统开发的信息来源，而虚拟配置的动力系统的特性参数也影响整车性能。两者之间的参数选择是一个多变量多目标的优化设计过程，而且参数选择与行驶工况和控制策略紧密相关，只有在建立准确的仿真模型的基础上，经过反复寻优计算才可能达到较好的设计结果。目前参数设计主要借助于通用的或专用的仿真软件进行离线仿真，如ADVISOR、EASY5、PSCAD、V2ELPH、FAHRSIM等，其优点是方便快捷，适合于在设计初期对系统性能进行宏观的预估和评价，但难以对动力系统进行深入细致的分析与设计。随着系统开发的不断深入，某些已经存在的部件或环节将会集成仿真回路进行测试与研究，这些部件包括难建模部件、整车控制器及驾驶员等。为了实现虚拟模型与真实部件的联系，必须建立实时的仿真开发环境。目前实时仿真

在燃料电池汽车领域主要用于整车控制器的在环仿真。例如，采用dSPACE建立整车控制器的硬件在环仿真环境。而集成真实部件的动力系统实时仿真测试环境，将是整车与动力系统的参数选择与优化设计的技术升级方向。

8. 多能源动力系统的能量管理策略

能量管理策略对燃料经济性影响很大，且受到动力系统参数和行驶工况的双重影响。目前的开发方式一般是借助仿真技术建立一个虚拟开发环境，对动力系统模型进行合理简化，从理论分析的角度得到最优功率分配策略与能量源参数和工况特征之间的解析关系，并从该关系出发定量地分析功率缓冲器特性参数对最优功率分配策略的影响，为功率缓冲器的参数选择提供理论依据。最终目的是定量地分析工况特征参数与最优功率分配策略之间的映射关系，完成功率分配策略的工况适应性研究。

完成能量管理策略的工况适应性开发后，其核心问题转变为功率分配优化，当然还必须考虑一些限制条件，如蓄电池容量的限制和各部件额定值的限制等。可用作功率分配的决策输入量很多，如SOC值、总线电压、车速、驾驶员功率需求等。按照是否考虑这些变量的历史状态，可以把功率分配策略分为瞬时与非瞬时策略两大类。

作为能量管理策略中的一部分，制动能量回馈是提高燃料经济性的重要措施，也是一个难点问题。必须综合考虑制动稳定性、制动效能、驾驶员感觉、蓄电池充电接受能力等限制条件。制动系统关乎生命安全，而且制动过程通常很短暂，在研究初期一般不直接进行道路试验，而是在建立系统动态模型的基础上再进行深入细致的仿真研究。

以上是燃料电池电动汽车主要关键技术的介绍，它们对整车的动力性、经济性和安全性影响非常大，是需要解决的核心问题。

7.1.5 燃料电池电动汽车主要技术指标

在电动汽车科技发展“十二五”专项规划中，提出了下一代燃料电池电动汽车主要技术指标，见表7-1。

表7-1 下一代燃料电池电动汽车主要技术指标

指标		燃料电池电动轿车	燃料电池电动客车
燃料电池	电堆比功率/(W/kg(L))	1000(面向示范考核) 1500(面向技术突破)	
	系统比功率/(W/kg)	300(面向示范考核) 450(面向技术突破)	
	低温储存与启动/℃	-10(面向示范考核) -20(面向技术突破)	
	寿命/h	≥5000	
车用电机	功率密度/(kW/kg)	3.0	
	最高效率/(%)	94	
电子控制		新型电机集成驱动的底盘动力学控制技术； 下一代纯电驱动整车控制系统关键技术； 纯电驱动汽车ITS及车网融合(V2G，V2H)技术	

（续表）

指　　标		燃料电池电动轿车	燃料电池电动客车
整车平台	最高车速/(km/h)	≥160	≥80
	续驶里程/(km)	≥350	≥350
	经济性/(kg/100km)	≤1.2(示范)	≤8.8(示范)
		≤1.1(下一代)	≤8.5(下一代)

7.2 燃料电池电动汽车的基本结构

目前燃料电池电动汽车绝大多数采用的是混合式燃料电池驱动系统，将燃料电池与辅助动力源相结合，燃料电池可以只满足持续功率需求，借助辅助动力源提供加速、爬坡等所需的峰值功率，而且在制动时可以将回馈的能量存储在辅助动力源中。混合式燃料电池驱动系统有并联式和串联式两种，如图7.4所示。

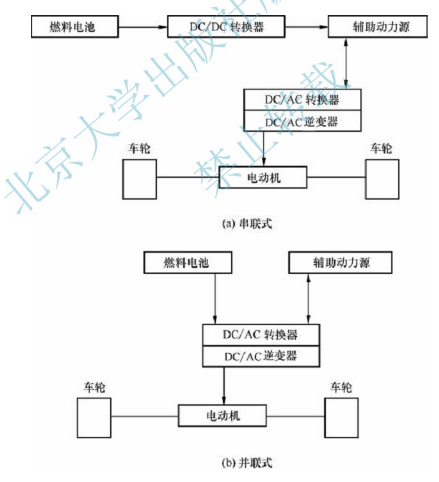


图7.4　燃料电池电动汽车的驱动系统框图

燃料电池电动汽车的动力系统由燃料电池发动机、辅助动力源、DC/DC 转换器、DC/AC 逆变器和电动机组成。

7.2.1 燃料电池发动机

在FCEV所采用的燃料电池发动机中，为保证PEMFC组的正常工作，除以PEMFC组为核心外，还装有氢气供给系统、氧气供给系统、气体加湿系统、反应生成物的处理系统、冷却系统和电能转换系统等。只有这些辅助系统匹配恰当和正常运转，才能保证燃料电池发动机正常运转。

1. 以氢为燃料的燃料电池发动机系统

图7.5所示是以氢为燃料的燃料电池发动机系统。图7.6所示是以氢气为燃料的FCEV的总布置基本结构模型。

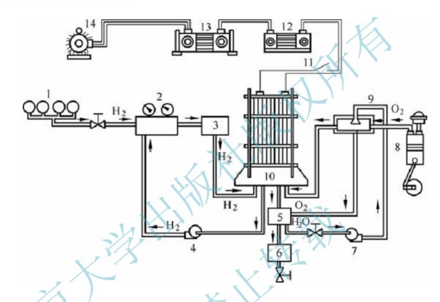


图7.5 以氢为燃料的燃料电池发动机系统

1—氢储存罐；2—氢气压力调节仪表；3—热交换器；4—氢气循环泵；
5—冷凝器及气水分离器；6—水箱；7—水泵；8—空气压缩机(或氧气罐)；
9—加湿器及去离子过滤装置；10—燃料电池组；11—电源开关；
12—DC/DC转换器；13—DC/AC逆变器；14—驱动电动机

(1) 氢气供应、管理和回收系统。气态氢通常用高压储气瓶来装载，对高压储气瓶的品质要求很高，为保证燃料电池电动汽车一次充气有足够的行驶里程，就需要多个高压储气瓶来储存气态氢。一般轿车需要2～4个高压储气瓶，大客车上需要5～10个高压储气瓶。

液态氢虽然比能量高于气态氢，由于液态氢是处于高压状态的，不但需要用高压储气瓶储存，还要用低温保温装置来保持低温。低温的保温装置是一套复杂的系统。

在使用不同压力的氢(高压气态氢和高压低温液态氢)时，就需要用不同的氢气储存容器，用不同的减压阀、调压阀、安全阀、压力表、流量表、热量交换器和传感器等来进行控制。并对各种管道、阀和仪表等的接头采取严格的防泄漏措施。从燃料电池中排出的水，含有未发生反应的少量的氢气。正常情况下，从燃料电池排出的氢气量应低于1%以下，应用氢气循环泵将这少量的氢气回收。

(2) 氧气供应和管理系统。氧气的来源有从空气中获取氧气或从氧气罐中获取氧气两

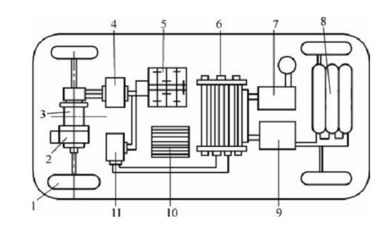


图 7.6 以氢气为燃料的 FCEV 的总布置基本结构模型

1—驱动轮；2—驱动系统；3—驱动电动机；4—DC/AC 逆变器；5—辅助电源装置（动力电池组＋飞轮储能器或动力电池组＋超级电容）；6—燃料电池发动机；7—空气压缩机及空气供应系统辅助装置；8—氢气储存罐；9—氢气供应系统辅助装置；10—中央控制器；11—动力 DC/DC 转换器

种方式。空气需要用压缩机来提高压力，以增加燃料电池反应的速度。在燃料电池系统中，配套压缩机的性能有特定的要求，压缩机质量和体积会增加燃料电池发动机系统的质量、体积和成本，压缩机所消耗的功率会使燃料电池的效率降低。空气供应系统的各种阀、压力表、流量表等的接头要采取防泄漏措施。在空气供应系统中还要对空气进行加湿处理，保证空气有一定的湿度。

(3) 水循环系统。燃料电池发动机中，燃料电池在反应过程中将产生水和热量，在水循环系统中要用冷凝器、气水分离器和水泵等对反应生成的水和热量进行处理，其中一部分水可以用于空气的加湿。另外还需要装置一套冷却系统，以保证燃料电池的正常运转。

(4) 电力管理系统。燃料电池所产生的是直流电，需要经过 DC/DC 转换器进行调压，在采用交流电动机的驱动系统中，还需要用 DC/AC 逆变器将直流电转换为三相交流电。

以氢气为燃料的燃料电池发动机的各种外围装置的体积和质量，占燃料电池发动机总体积和质量的 1/3～1/2。

2. 以甲醇为燃料的燃料电池发动机

图 7.7 所示为以甲醇为燃料的燃料电池发动机系统。在以甲醇为燃料的燃料电池发动机系统中，用甲醇供应系统代替了上述的氢气供应系统。其包括甲醇储存装置、甲醇供应系统的泵、管道、阀门、加热器及控制装置等。

图 7.8 所示为以甲醇为燃料的 FCEV 的总布置基本模型。

(1) 甲醇储存装置。甲醇可以用普通容器储存，不需要加压或冷藏，可以部分利用内燃机汽车的供应系统，有利于降低 FCEV 的使用费用。

(2) 燃烧器、加热器和蒸发器。甲醇进入改质器之前，要用加热器加热甲醇和纯水的混合物，使甲醇和纯水的混合物一起受高温(621℃)热量的作用，蒸发成甲醇和纯水的混合气，然后进入改质器。

(3) 重整器。重整器是将甲醇用改质技术转化为氢气的关键设备。不同的碳氢化合物采用不同的重整技术，在重整过程中的温度、压力会有所不同。例如，甲醇用水蒸气重整

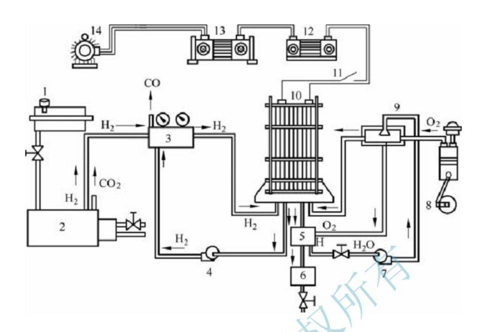


图 7.7　以甲醇为燃料的燃料电池发动机系统

1—甲醇储存罐；2—带燃烧器的改质器；3—H_2 净化装置；4—氢气循环泵水循环系统；
5—冷凝器及气水分离器；6—水箱；7—水泵；8—空气压缩机(或氧气罐)；
9—加湿器及去离子过滤装置；10—燃料电池组；11—电源开关；
12—DC/DC 转换器；13—DC/AC 逆变器；14—驱动电动机

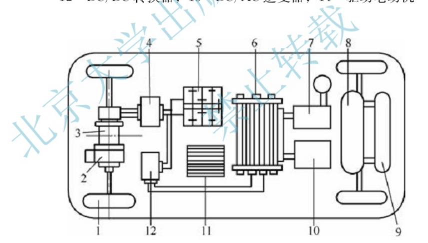


图 7.8　以甲醇为燃料的 FCEV 的总布置基本模型

1—驱动轮；2—驱动系统；3—驱动电动机；4—DC/AC 逆变器；5—辅助电源装置(动力电池组＋飞轮储能器，或动力电池组＋超级电容器)；6—燃料电池发动机；7—空气压缩机及空气供应系统辅助装置；8—重整器；9—甲醇罐；10—氢气供应系统辅助装置；11—中央控制器；12—动力 DC/DC 转换器

法的温度为 621℃，用部分氧化重整法的温度为 985℃，用废气重整法的第一阶段温度为 985℃，第二阶段温度为 250℃。当 FCEV 用甲醇经过重整产生的氢气做燃料时，就需要对各种重整方法进行分析，选择最佳重整技术和最适合 FCEV 配套的重整器。

(4) 氢气净化器。改质器所产生的 H_2 因为含有少量的 CO，因此必须对 H_2 进行净化处理。净化器中用催化剂来控制，使 H_2 中所含的 CO 被氧化成二氧化碳 CO_2 后排出，最终进入 PEMFC 的 H_2 中的 CO 的含量不超过规定的 10^{-5}。甲醇经过改质后所获得的氢气

作为燃料时，燃料电池的效率为40%～42%。以甲醇为燃料的燃料电池系统中的氧气供应、管理系统，反应生成的水和热量的处理系统和电力管理系统，与以氢为燃料的燃料电池系统基本相同。

燃料电池发动机的运转一般采用计算机进行控制，根据FCEV的运行工况，通过CAN总线系统进行信息传递和反馈，并经过计算机的处理，以保证燃料电池正常运行。

7.2.2 辅助动力源

在FCEV上燃料电池发动机是主要电源，另外还配备有辅助动力源。根据FCEV的设计方案不同，其所采用的辅助动力源也有所不同，可以用蓄电池组、飞轮储能器或超大容量电容器等共同组成双电源系统。在具有双电源系统的FCEV上，驱动电动机的电源可以出现以下驱动模式：

(1) 在FCEV起动时，由辅助动力源提供电能带动燃料电池发动机起动，或带动车辆起步。

(2) 车辆行驶时，由燃料电池发动机提供驱动所需全部电能，剩余的电能储存到辅助动力源装置中。

(3) 在加速和爬坡时，若燃料电池发动机提供的电能还不足以满足FCEV驱动功率要求，则由辅助动力源提供额外的电能，使驱动电动机的功率或转矩达到最大，形成燃料电池发动机与辅助动力源同时供电的双电源的供电模式。

(4) 储存制动时反馈的电能，以及向车辆的各种电子、电器设备提供所需要的电能。

由于燃料电池发动机的比功率和比能量在不断改进和提高，现代燃料电池电动汽车逐步向加大燃料电池发动机功率的方向发展，最终实现由燃料电池发动机提供驱动所需全部电能。

另外采用42V蓄电池来储存制动时反馈的电能，并为车载电子电器系统提供电能。因此，可以取消用于辅助驱动的动力电池组，减轻辅助电池组和整车的质量。

7.2.3 DC/DC转换器

1. 装置DC/DC的必要性

FCEV采用的电源有各自的特性，燃料电池只提供直流电，电压和电流随输出电流的变化而变化。燃料电池不可能接受外电源的充电，电流的方向只是单向流动的。

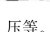
FCEV采用的辅助电源(蓄电池和超级电容器)在充电和放电时，也是以直流电的形式流动，但电流的方向是可逆的。

FCEV上的各种电源的电压和电流受工况变化的影响呈不稳定状态。为了满足驱动电动机对电压和电流的要求及对多电源电力系统的控制，在电源与驱动电动机之间，用计算机控制实现对FCEV的多电源的综合控制，保证FCEV的正常运行。FCEV的燃料电池需要装置单向DC/DC转换器，蓄电池和超级电容器需要装置双向DC/DC转换器。

2. DC/DC转换器的基本功能

DC/DC转换器具有以下基本功能。

(1) 当输入直流电压在一定范围内变化时，能输出负载要求的变化范围的直流电压，例如，输入电压最低时也能达到最高输出电压，输入电压最高时也能达到最低输出电



压等。

(2) 输出负载要求的直流电流(范围)：能够输出足够的直流负载电流，并且能够允许在足够宽的负载变化范围的情况下(例如，从空载到满载，即电流从零到最大)，设备能正常运行(例如，电压稳定、不损坏器件)。

3. FCEV 车载 DC/DC 的功能

燃料电池轿车中的 DC/DC 转换器的主要功能，概括起来主要包括以下 3 点：

(1) 调节燃料电池的输出电压。由于燃料电池的输出特性较软，输出电压随负载的变化而变化，轻载时输出电压偏高，重载时输出电压偏低，难以满足驱动电动机控制器的需求，所以借助 DC/DC 转换器对燃料电池的输出电压进行调节。

(2) 调节整车能量分配。燃料电池轿车是一种混合动力轿车，配有燃料电池和动力蓄电池两种能源，控制燃料电池的输出能量就可以控制整车能量的分配。如果燃料电池的输出能量不足以驱动电动机，缺口能量就由动力蓄电池来补充；当燃料电池输出的能量超出电动机的需求时，多余的能量可以后进入蓄电池中，补充蓄电池的能量。DC/DC 转换器用于控制燃料电池的能量输出。

(3) 稳定整车直流母线电压。燃料电池的输出电压经过 DC/DC 转换器后能稳定整车直流母线电压。

4. FCEV 车载 DC/DC 转换器的要求

DC/DC 转换器在燃料电池电动汽车中起着重要的作用，它的性能必须满足以下要求：

(1) 转换器是能量传递部件，因此需要的转换效率要高，以便提高能源的利用率。

(2) 为了降低对燃料电池的输出电压要求，转换器应具有升压功能。

(3) 由于燃料电池存在输出不稳定的问题，需要转换器闭环运行进行稳压，为了给驱动器以稳定的输入，需要转换器有较好的动态调节能力。

(4) 体积小，重量轻。

7.2.4 驱动电动机

燃料电池电动汽车用的驱动电动机主要有直流电动机、交流电动机、永磁电动机和开关磁阻电动机等。

直流电动机驱动系统采用换向器和电刷，保证了励磁磁动势与电枢磁动势的严格正交，易于控制。但直流电动机结构复杂，其高速性能和可靠性受换向器和电刷的影响较大。随着交流调速理论及电力电子器件技术的发展，目前在燃料电池汽车上的应用已逐步减少。

交流电动机坚固耐用、结构简单、技术成熟、免维护、成本低，尤其适合恶劣的工作环境。其缺点在于损耗大、效率低、功率因数低，进而导致控制器容量增加，成本上升。美国制造的燃料电池汽车较为广泛地使用交流异步电动机系统，例如，GM 开发的燃料电池汽车 Sequel 采用了 60kW 的异步电动机。

永磁电动机驱动系统，通常可分为方波供电的无刷直流电动机和正弦波供电的永磁同步电动机。转子采用永磁体，不需要励磁。因此，功率因数大，电动机具有较高的功率密度和效率。但受永磁材料性能的影响，目前仍然存在成本高、可靠性较低及使用寿命较短的缺点。另外，永磁电动机的控制器在电动机发生故障而起保护作用时，由于永磁体的原因电动机会产生与转速成正比的反电势并通过反向二极管加在高压母线两端，造成

潜在的安全问题。与异步电动机相比，永磁电动机安全性稍差。目前日本汽车公司较多采用永磁电动机驱动系统，如本田推出的燃料电池汽车 FCX 前轮驱动电动机为 80kW 的永磁电动机。

开关磁阻电动机驱动系统作为一种基于“磁阻最小原理”设计的新型电动机，定子、转子均采用凸极结构，具有结构简单、可靠性高、控制简便及功率/转矩特性优越的特点。但存在噪声大、转矩和母线电流脉动严重的缺陷。因此，在燃料电池汽车上应用较少。

燃料电池汽车驱动电动机的选型必须结合整车开发目标，综合考虑电动机的特点。驱动电动机的详细内容见第 3 章的介绍。

7.2.5 动力电控系统

燃料电池汽车的动力电控系统，主要由燃料电池发动机管理系统(FCE-ECU)、蓄电池管理系统(BMS)、动力控制系统(PCU)及整车控制系统(VMS)组成，而原型车的变速器系统会简化很多。其系统结构框图如图 7.9 所示。

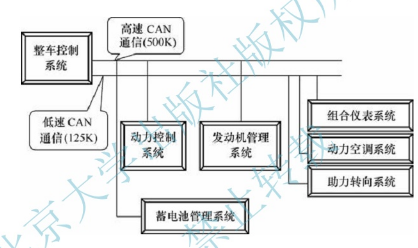


图 7.9 燃料电池汽车动力电控系统结构框图

1. 发动机管理系统

燃料电池发动机管理系统，按整车控制器的功率设定值控制燃料电池发动机的功率输出，监测发动机的工作状态，保证发动机稳定可靠地运行时进行故障诊断及管理。其具体组成包括供氢系统、供氧系统、水循环及冷却系统。

2. 蓄电池管理系统

蓄电池管理系统分上下两级：下级 LECU 负责蓄电池组电压、温度等物理参数的测量，进行过充过放保护及组内组间均衡；上级 CECU 负责动力蓄电池组的电流检测及 SOC 估算，以及相关的故障诊断，同时运行高压漏电保护策略。

3. 动力控制系统

动力控制系统包含 DC/DC 转换器、DC/AC 逆变器、DCL 和空调控制器及空调压缩机变频器，以及电动机冷却系统控制器。DC/DC 转换器和 DC/AC 逆变器的作用如前所述，DCL 负责将高压电源转换为系统零部件所需的 12V/24V 低压电源，电动机冷却系统控制器负责电动机及 PCU 的水冷却系统控制。

4. 整车控制系统

整车控制系统的核心是多能源控制策略(包括制动能量回馈功能)，它一方面接收来自驾驶员的需求信息(如点火开关、油门踏板、制动踏板、挡位信息等)实现整车工况控制；另一方面基于反馈的实际工况(如车速、制动、电动机转速)以及动力系统的状况(燃料电池及动力蓄电池的电压、电流等)，根据预先匹配好的多能源控制策略进行能量分配调节控制。当然，整车的故障诊断及管理也由它负责。

上述各系统都通过高速 CAN - Bus 进行信息交换。在上述基本动力系统架构基础上，可以根据混合度的不同，把燃料电池混合动力汽车分为电量消耗型和电量维持型。所谓混合度，是指燃料电池额定输出功率与驱动电动机的额定功率之比。前者的混合度较低，蓄电池是主要的能量源，燃料电池只作为里程延长器来使用；后者的混合度较高，在行驶过程中蓄电池的荷电状态基本保持在一个合理的范围。目前国外大部分及国内全部都采用该方案。

7.3 燃料电池电动汽车传动系统参数设计

7.3.1 驱动电动机

1. 电动机的选型

受有限的车内空间、恶劣的工作环境及频繁的运行工况切换影响，燃料电池汽车用电动机必须具有以下特性：高功率密度，以满足布置要求；瞬时过载能力强，以满足加速和爬坡要求；宽的调速范围(包括恒转矩区和恒功率区)；转矩动态响应快，在运行的整个转矩—转速范围内具有高效率，以提高能量利用率；四象限运行，状态切换平滑；高可靠性及容错控制；成本合理。

燃料电池汽车用电动机的选型必须结合整车开发目标，综合考虑电动机驱动系统的特点。具体可参考表 7 - 2 所示的电动机驱动系统综合性能评价指标。由表 7 - 2 可知，异步电动机及永磁同步电动机得分较高，与世界范围内燃料电池汽车电动机驱动系统的发展趋

表 7 - 2 电动机驱动系统综合性能评价

项目	直流电动机	异步电动机	永磁同步电动机	开关磁阻电动机
功率密度	2	3	5	3
效率	2	3	5	3
成本	4	5	3	4
可靠性	3	5	4	5
控制性	5	4	5	3
技术成熟度	5	5	4	3
安全性	4	5	3	5
总　计	25	30	29	26

势相一致。由于空间布置以及功率需求的原因，通常燃料电池客车较多采用异步电动机驱动系统，而燃料电池轿车较多采用永磁电动机驱动系统。

2. 电动机参数的确定

与传统汽车相类似，为保证各种行驶工况需要，满足汽车动力性要求，必须根据车辆动力性指标来研究电动机驱动系统的性能参数，即由最高车速、加速时间和最大爬坡度3个指标来评定。电动机参数主要包括额定功率、最大功率、最大转矩、额定转速、最高转速以及扩大恒功率区系数。

定义扩大恒功率区系数 β 为电动机的最高转速 n_{max} 和额定转速 n_e 之比，即

$$\beta=\frac{n_{max}}{n_e} \tag{7-1}$$

（1）电动机的最高转速。电动机的最高转速由最高车速和机械传动系统传动比来确定。增大电动机的最高转速有利于降低体积、减轻质量，最高转速的增大导致传动比增大，从而会加大传动系统的体积、重量和传动损耗。因此应综合考虑各方面因素决定电动机的最高转速，即

$$n_{max}=\frac{30u_{max}i}{3.6\pi r} \tag{7-2}$$

式中，n_{max} 为电动机最高转速；u_{max} 为汽车最高车速；i 为传动系统传动比，对于电动汽车来讲，由于电动机转速较高，因此传动比较大，一般传动比为8～15；r 为车轮滚动半径。

（2）最大转矩、最大功率、额定转速。电动机的最大转矩由最大爬坡度确定，汽车爬坡时车速很低，可忽略空气阻力，则有

$$T_{g\,max}=\frac{r}{\eta i_0}(mgf\cos\alpha_{max}+mg\sin\alpha_{max}) \tag{7-3}$$

式中，$T_{g\,max}$ 为根据最大爬坡度确定的最大转矩；m 为整车质量；f 为滚动阻力系数；η 为机械传动系统效率；α_{max} 为最大坡道角。

电动机的最大功率取决于加速时间，并与扩大恒功率区系数有关。在最高转速一定，并保证同等加速能力的情况下，电动机的扩大恒功率区系数越大，其最大功率越小，并随着扩大恒功率区系数的增大，最大功率趋于饱和。因此，扩大恒功率区系数的取值，对于降低电动机系统功率需求、减小电动机驱动系统质量与体积、提高整车效率，有着非常重要的意义。扩大恒功率区系数的取值取决于电动机驱动系统类型及控制算法，通常取2～4。

水平路面上，车辆从0到目标车速 u_a 的加速时间为

$$t=\int_0^{u_a}=\frac{\delta m}{F_t-F_f-F_w}\mathrm{d}u \tag{7-4}$$

式中，δ 为旋转质量换算系数；F_t 为车辆行驶驱动力；F_f 为滚动阻力；F_w 为空气阻力。

车辆行驶驱动力与电动机峰值功率、最大转矩之间的关系为

$$F_t=\begin{cases}9550i_0\dfrac{P_{max}\eta}{n_e r}=T_{\alpha\,max}\eta i_0/r & (n\leqslant n_e)\\[2ex] 9550i_0\dfrac{P_{max}\eta}{nr} & (n>n_e)\end{cases} \tag{7-5}$$

式中，$T_{\alpha\,max}$ 为根据峰值功率 P_{max} 折算的恒转矩区电动机最大转矩。

当给定汽车加速时间后，可根据式(7-3)和式(7-5)求得电动机峰值功率。

一般峰值功率 P_{max} 满足加速性能指标要求，其折算后的最大转矩 $T_{\alpha\,max}$ 也可以满足汽车爬坡性能指标要求，即 $T_{\alpha\,max}>T_{g\,max}$，因此，电动机最大转矩可设计为 $T_{max}=T_{\alpha\,max}$。如果车辆爬坡度有特殊要求，则取 $T_{max}=T_{g\,max}$，并通过调整最大功率和扩大恒功率区系数重新匹配。

(3) 额定功率和额定转矩。电动机额定功率主要克服滚动阻力和空气阻力，可由式(7-6)确定。

$$P_e=(F_f+F_w)\frac{u}{3600\eta} \tag{7-6}$$

式中，u 可按车辆最高设计车速的 90%或我国高速公路最高限速 120km/h 取值。

电动机的额定转矩为

$$T_e=9550P_e/n_e \tag{7-7}$$

(4) 工作电压。工作电压的选择涉及用电安全、元器件的工作条件等问题。工作电压过低，导致电流过大，从而导致系统电阻损耗增大，而工作电压过高，会对逆变器的安全性造成威胁。一般燃料电池汽车工作电压为 280～400V，但目前工作电压的设计有增高的趋势。

7.3.2 传动系统传动比

传动系统的总传动比是传动系统中各部件传动比的乘积，主要是变速器和主减速器的传动比的乘积。

电动机的机械特性对驱动车辆十分有利，因此，传动系统有多个挡位时，驱动力图与内燃机汽车相比也有其特殊性，所以在选择挡位数和速比、确定最高车速时也与内燃机汽车不同。下面对可能出现的几种情况进行分析：

(1) 电动机从额定转速向上调速的范围足够大，即 $u_{max}/n_e\geqslant2.5$ 时，选择一个挡位即可，即采用固定速比。这是一种理想情况。

(2) 电动机从额定转速向上调速的范围不够宽，即电动机最高转速不能满足 $n_{max}/n_e\geqslant2.5$ 时，应考虑再增加一个挡位。

(3) 电动机从额定转速向上调速的范围较窄，满足 $n_{max}/n_e\leqslant1.8$，此时增加一个挡位后车速无法衔接起来，可考虑再增加挡位或说明电动机参数与整车性能要求不匹配，应考虑重新选择电动机的参数。

由于燃料电池电动汽车的动力全部由电动机提供，通过控制电动机能够在较大的范围满足车速要求。最大传动比根据电动机的最大转矩和最大爬坡度对应的行驶阻力确定，即

$$i_{max}\geqslant\frac{F_{\alpha\,max}r}{\eta T_{max}} \tag{7-8}$$

式中，$F_{\alpha\,max}$ 为最大爬坡度对应的行驶阻力。

汽车大多数时间是以最高挡行驶的，即用最小传动比的挡位行驶。因此，最小传动比的选择是很重要的。应考虑满足最高车速的要求和行驶在最高车速时的动力性要求。

(1) 由最高车速和电动机的最高转速确定传动系最小传动比的上限，即

$$i_{min}\leqslant\frac{0.377n_{max}r}{u_{max}} \tag{7-9}$$

(2) 由电动机最高转速对应的最大输出转矩和最高车速对应的行驶阻力，确定传动系



最小传动比的下限，即

$$i_{\min} \geqslant \frac{F_{u\max} r}{\eta T_{u\max}} \tag{7-10}$$

式中，$F_{u\max}$为最高车速对应的行驶阻力；$T_{u\max}$为电动机最高转速对应的最大输出转矩。

7.3.3 燃料电池

燃料电池功率的选择，对燃料电池电动汽车动力系统的结构设计非常重要。燃料电池功率偏大，车辆的成本增加；燃料电池功率偏小，在某些大负荷行驶工况(如加速、爬坡等)需要辅助能源提供的动力增加，这使得燃料电池数量增加，整车质量、成本上升，系统效率下降，整车布置难度增加，燃料电池均衡控制难度增加等。

燃料电池电动汽车是由燃料电池提供平均行驶功率，在加速、爬坡、高速等大负荷工况下蓄电池输出电能辅助驱动，因而燃料电池功率选择的依据是平均行驶阻力功率。

平均行驶阻力功率是由车辆整车参数和行驶工况来决定的，可用式(7-11)表达：

$$P_{\mathrm{av}} = \frac{1}{T}\sum_{i=1}^{n} P_i t_i \tag{7-11}$$

式中，P_{av}为平均行驶阻力功率；t_i 为第 i 个功率区间行驶时间；T 为总的行驶时间。

对于燃料电池城市客车，平均行驶阻力功率也可以选取中国典型城市循环工况来确定，如图 7.10 所示。

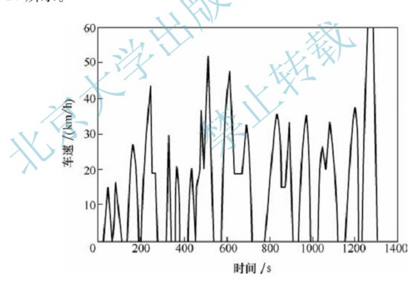


图 7.10 中国典型城市客车循环工况

平均行驶阻力功率可由加速和匀速行驶过程中消耗的能量来计算：

$$P_{\mathrm{av}} = \frac{1}{t_{\mathrm{a}} + t_{\mathrm{v}}}\left[\sum_{i=1}^{n}\int_{0}^{t_{\mathrm{a}_i}} F_{\mathrm{t}} u \mathrm{d}t + \sum_{j=1}^{n}\int_{0}^{t_{\mathrm{v}_j}} F_{\mathrm{t}} u \mathrm{d}t\right] \tag{7-12}$$

式中，$t_{\mathrm{a}} = \sum_{i=1}^{m} t_{\mathrm{a}_i}$；$t_{\mathrm{v}} = \sum_{j=1}^{n} t_{\mathrm{v}_j}$；$t_{\mathrm{a}_i}$ 为第 i 个加速行驶时间；t_{v_j}为第 j 个匀速行驶时间；u 为车速。

实际计算中，燃料电池电动汽车的燃料电池应能单独提供汽车最大速度稳定运行所要求的功率，并留有一定的富余功率对蓄电池充电，所以按汽车的最高车速下的平均行驶阻力功率计算燃料电池的需求功率：

$$P_{fc}=\frac{1}{\eta_T\eta_m\eta_c}\left(\frac{Gfu_{max}}{3600}+\frac{C_DAu_{max}^3}{76140}\right) \quad (7-13)$$

式中，P_{fc}为汽车最高车速下的平均行驶阻力功率；η_m为电动机驱动系统效率；η_c为DC/DC转换器的效率。

燃料电池输出功率大部分转化为驱动能量，剩余部分用于满足辅助系统的功率需求。在纯燃料电池驱动的情况下，输出功率为

$$P_{fc_out}=P_{fc}+P_{fc_par} \quad (7-14)$$

式中，P_{fc_out}为燃料电池的输出功率；P_{fc_par}为辅助系统的功率需求。

在实际运行时，为了保证对电动机的电力供应以及对蓄电池进行充电，燃料电池应留有一定的后备功率。

由此可见，燃料电池功率的选择应遵循以下原则：

(1) SOC值在循环工况前后维持不变，从而确保燃料电池是整个行驶过程中功率消耗的唯一来源，因此燃料电池的功率应大于平均行驶阻力功率。

(2) 燃料电池的最大功率应不高于车辆以最高车速稳定行驶时的需求功率，避免燃料电池单独驱动状态下有过多的富裕功率。

7.3.4 辅助动力源

燃料电池电动汽车的辅助动力源为蓄电池组，在汽车起步的工况下，完全由辅助动力源提供动力；当汽车在加速或爬坡等工况时，为主动力源提供能源补充；同时在汽车制动时吸收制动回馈的能量。

1. 电池类型的选择

辅助动力源用的蓄电池要在整车有较大功率需求时，可以对其进行大电流的放电，待燃料电池响应跟上后放电电流就大幅降低，大电流放电的持续时间不长；在整车进行制动回馈时，又可以在短时间内接受较大电流的充电，即电池要具有瞬间大电流充放电的能力。虽然充放电电流很大，但由于持续时间都较短，因此电池的充电或放电深度都不大，电池的荷电状态(SOC)的波动范围也不大。表7-3介绍了几种不同类型的辅助动力源蓄电池主要性能的比较。

表7-3 几种不同类型的辅助动力源蓄电池主要性能比较

电池类型	比能量/(W·h/kg)	比功率/(W/kg)	适用类型	其他描述
铅酸电池	30～45	200～300	辅助动力	现有生产维护设备完善，回收利用率高，但低温性能差
镍镉电池	40～60	150～350	辅助动力	现有生产维护设备完善，但高温性能差，需要有散热系统，回收困难且费用高，对人体有害
金属氢化物镍电池	60～70	150～300	两者皆可	高温时电压变化大，自放电率高，需要有散热系统，制造成本较高
锂离子电池	90～130	250～450	两者皆可	高温时周期寿命下降，低温放电时电压特性软，使用时要严禁过充过放，安全性要求很高

从表7-3的分析看，电池的选型存在诸多方案，但目前主流是金属氢化物镍电池和锂离子蓄电池。其中，金属氢化物镍电池目前已在电动工具、电动车辆和混合动力汽车中逐步得到应用，如日本丰田汽车公司的混合动力汽车Prius中采用的就是金属氢化物镍电池。而锂离子蓄电池的诸多优点也引起了世界各国极大的研究兴趣。日本、美国、加拿大、法国、德国等都已经在电动车用锂离子蓄电池的开发方面取得了很大进展，如通用汽车公司为了在其新版的Hy-Wire上提高效率，配备了法国SAFT公司生产的蓄电池。

对于燃料电池电动客车，超级电容器作为辅助动力源是一个新选择。超级电容器是依靠电解质与电极间形成特有的电双层结构和电极表面的氧化还原反应来存储能量。能量密度是普通电容的10～100倍，循环使用寿命是500000次。

超级电容器在充放电的整个过程中，没有任何化学反应和无高速旋转等机械运动，不存在对环境的污染，也没有任何噪声，结构简单，质量轻，体积小，是一种更加理想的储能器。超级电容器极低的比能量使得它不可能单独用作电动客车的能量源，但作为辅助能量源使用具有显著优点。在汽车起动和爬坡时快速提供大功率电流，在正常行驶时由主动力源快速充电，在制动时快速存储发电机产生的大电流，这可减少电动客车对蓄电池大电流充电的限制，提高电动客车的实用性。

2. 蓄电池参数的确定

蓄电池的参数由以下因素确定：

(1) 能回收大部分制动能量；

(2) 在混合驱动模式下，能满足车辆驱动和辅助电器系统的功率需求。

蓄电池的功率需求包括最大放电功率需求和最大充电功率需求。对于燃料电池汽车，蓄电池的首要作用是提供瞬时功率。根据整车的动力性能要求，分析各个工况，如汽车起步、爬坡、超车等的功率需求，除以机械效率，可以得到对动力源的最大功率需求。该功率由蓄电池和燃料电池共同提供。

当汽车长时间匀速行驶时，可以认为此时功率仅由燃料电池提供，由此可以计算出燃料电池的功率，则系统对蓄电池的放电功率需求为总功率需求减去燃料电池的功率。

另外，汽车在紧急制动时产生的制动功率很大，但以此功率来设计蓄电池的最大充电功率是不合理的。实际上，制动能量回收效益最明显的是在城市循环工况下，根据城市循环工况的统计特性来选择最大充电功率。

根据上述分析，蓄电池的额定功率可由式(7-15)确定：

$$P_{bat_rat}=\frac{P_{max}}{\eta_m}+P_{aux}-P_{fc_out}+P_{fc_par} \tag{7-15}$$

式中，P_{bat_rat}为动力蓄电池的额定功率；P_{aux}为车辆辅助电器系统的功率需求。

蓄电池的质量为

$$m_{bat}=\frac{P_{bat_rat}}{\rho_{bat_pow}} \tag{7-16}$$

式中，m_{bat}为蓄电池的质量(kg)；ρ_{bat_pow}为蓄电池的比功率。

蓄电池的额定容量为

$$Q_{bat}=\frac{m_{bat}\rho_{bat_en}}{U_{bat_rat}\eta_{bat_dis}} \tag{7-17}$$

式中，Q_{bat}为蓄电池的额定容量；ρ_{bat_en}为蓄电池的比能量；U_{bat_rat}为蓄电池的额定电压；

η_{bat_dis}为蓄电池的放电效率。



1. 燃料电池电动汽车有哪些类型?其特点是什么?
2. 燃料电池电动汽车由哪几部分组成?其作用是什么?
3. 在燃料电池电动汽车设计中,如何确定燃料电池、电动机和蓄电池参数?